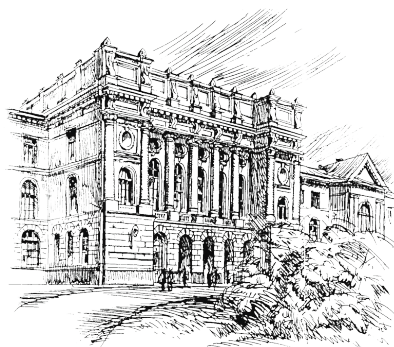


З(150)/2012



Научно-технические ведомости СПбГПУ

ИНФОРМАТИКА.
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ.
УПРАВЛЕНИЕ

Санкт-Петербург. Издательство Политехнического университета

Министерство образования и науки РФ

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбГПУ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА

Алферов Ж.И., академик РАН; *Васильев Ю.С.*, академик РАН (председатель);
Костюк В.В., академик РАН; *Лопота В.А.*, чл.-кор. РАН;
Окрепилов В.В., академик РАН; *Рудской А.И.*, чл.-кор. РАН;
Патон Б.Е., академик НАН Украины и РАН; *Федоров М.П.*, академик РАН;
Фортов В.Е., академик РАН.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Васильев Ю.С., академик РАН (главный редактор); *Арсеньев Д.Г.*, д-р техн. наук, профессор;
Бабкин А.В., д-р экон. наук, профессор (зам. гл. редактора);
Боронин В.Н., д-р техн. наук, профессор; *Глухов В.В.*, д-р экон. наук, профессор;
Дегтярева Р.В., д-р ист. наук, профессор; *Иванов А.В.*, д-р техн. наук, профессор;
Иванов В.К., д-р физ.-мат. наук, профессор; *Козловский В.В.*, д-р физ.-мат. наук, профессор;
Рудской А.И., чл.-кор. РАН (зам. гл. редактора); *Юсупов Р.М.*, чл.-кор. РАН.

СЕРИЯ “ИНФОРМАТИКА. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ. УПРАВЛЕНИЕ”

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ СЕРИИ

Юсупов Р.М., чл.-кор. РАН – председатель;
Абрамов С.М., чл.-кор. РАН;
Воеводин В.В., чл.-кор. РАН;
Заборовский В.С., д-р техн. наук, профессор;
Козлов В.Н., д-р техн. наук, профессор;
Фотиади А.Э., д-р физ.-мат. наук, профессор;
Черноруцкий И.Г., д-р техн. наук, профессор.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ СЕРИИ

Юсупов Р.М., чл.-кор. РАН – председатель;
Арсеньев Д.Г., д-р техн. наук, профессор – зам. председателя;
Бабкин А.В., д-р экон. наук, профессор – зам. председателя;
Пышкина Г.А., технический секретарь;
Антонов В.И., д-р техн. наук, профессор;
Голландцев Ю.А., д-р техн. наук, профессор;
Карнов Ю.Г., д-р техн. наук, профессор;
Коротков А.С., д-р техн. наук, профессор;
Макаров С.Б., д-р техн. наук, профессор;
Устинов С.М., д-р техн. наук, профессор;
Цикин И.А., д-р техн. наук, профессор;
Шкодырев В.П., д-р техн. наук, профессор;
Клавдиев В.Е., канд. техн. наук, доцент.

Журнал с 1995 года издается под научно-методическим руководством Российской академии наук.

Журнал с 2002 года входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Сведения о публикациях представлены в Реферативном журнале ВИНИТИ РАН, в международной справочной системе «Ulrich`s Periodical Directory».

Журнал зарегистрирован в Госкомпечати РФ. Свидетельство № 013165 от 23.12.94.

Подписной индекс **18390** в каталоге “Газеты. Журналы” Агентства “Роспечать”.

Журнал включен в базу данных “Российский индекс научного цитирования” (РИНЦ), размещенную на платформе Национальной электронной библиотеки на сайте <http://www.elibrary.ru>.

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

Адрес редакции и издательства: Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.
Тел. редакции серии (812) 552-62-16.

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2012

Содержание

Телекоммуникационные системы и компьютерные сети

Рогов С.А., Сергеев Д.С., Скороход В.В. Увеличение отношения сигнал-шум в акустооптическом анализаторе спектра с использованием астигматической оптики.....	7
--	---

Проблемы передачи и обработки информации

Шашихин В.Н., Богач Н.В., Чупров В.А. Вычисление криптографических характеристик схемы шифрования двумерных данных на основе tent-отображения.....	13
Бурдаков С.Ф., Харалдин Н.А. Планирование и оптимизация программных движений роботов методом конфигурационного пространства.....	17
Шашихин В.Н., Богач Н.В., Чупров В.А. Анализ криптостойкости алгоритмов шифрования на основе хаотического отображения типа tent.....	23
Григорьев Л.Ю., Заблоцкий А.А., Кудрявцев Д.В. Технология наполнения баз знаний онтологического типа.....	27

Системный анализ и управление

Аксенов К.А., Камельский В.Д. Анализ динамических моделей бизнес-процесса для разработки сервиса имитационного моделирования.....	37
Писарев А.И., Костин Е.В. Метод оптимального управления процессом плавки медного никельсодержащего сырья в печах Ванюкова.....	41

Вычислительные машины и программное обеспечение

Недоводеев К.В. Метод генерации графов потоков данных, используемых при автоматическом синтезе параллельных программ для неоднородных многоядерных процессоров.....	47
--	----

Математическое моделирование: методы, алгоритмы, технологии

Черноруцкий И.Г. Многокритериальный выбор на основе метода t-упорядочения.....	53
Белявский Г.И., Никоненко Н.Д. Алгоритм расчета безарбитражной цены финансового обязательства на основе дискретизации процессов Леви.....	56
Мазин В.Д. Представление физической величины в псевдоевклидовой плоскости.....	59
Черноруцкий И.Г. Функции релаксации градиентных методов.....	66
Бурлов В.Г., Зенина Е.А., Матвеев А.В. Синтез модели и способов функционирования системы в условиях конфликта.....	72
Стяпшин А.А. Онтологический подход к моделированию городской инфраструктуры.....	79
Ходырев И.А., Попова С.В. Обнаружение развилки в моделях процессов.....	82

Управление в социальных и экономических системах

Квятковская И.Ю., Сибикина И.В. <i>Энтропийный подход в задаче определения системных характеристик модели компетенции</i>	89
Рыбак В.А. <i>Анализ и оптимизация антропогенной нагрузки на окружающую среду</i>	93
Ханова А.А. <i>Концептуальная структура системы управления предприятием на основе интегрированных моделей (на примере грузового порта).....</i>	99
Кригер Л.С., Квятковская И.Ю. <i>Формализация типовых ситуаций в задачах управления движением общественного транспорта</i>	106
Голуб Ю.А., Новиков А.О. Логинова Д.А. <i>Анализ принципов формирования баз данных для мониторинга и оценки процессов наукоемкого кластерного развития</i>	110
<i>Сведения об авторах</i>	115
<i>Аннотации.....</i>	118

Contents

Telecommunication systems and computer networks

Rogov S.A., Sergeev D.S., Skorohod V.V. <i>Increase signal-to-noise ratio in acousto-optic spectrum analyzer with use astigmatic optics</i>	7
--	---

Information transfer and processing

Shashikhin V.N., Bogach N.V., Chuprov V.A. <i>A calculation of cryptographic properties for an encryption algorithm using chaotic tent map</i>	13
Burdakov S.F., Kharaldin N.A. <i>Planning and optimization of robot program motion by method of configuration space</i>	17
Shashikhin V.N., Bogach N.V., Chuprov V.A. <i>An encryption algorithm using chaotic tent map security evaluation</i>	23
Grigoriev L.Yu., Zablotzky A.A., Kudryavtsev D.V. <i>The technology for ontology instance data authoring</i>	27

System analysis and control

Aksyonov K.A., Kamelskiy V.D. <i>The analysis of business processes dynamic models for development of simulation service</i>	37
Pisarev A.I., Kostin E.V. <i>The method of optimal control of the smelting process of copper nickel-containing raw materials in furnaces Vanyukov</i>	41

Computer systems and software

Nedovodeev K.V. <i>A macro-flow graph generation technique, supporting automatic synthesis of parallel programs for heterogeneous multicore processors</i>	47
---	----

Mathematical modelling: methods, algorithms, technologies

Chernorytsky I.G. <i>Multi objective selection based on t-sorting method</i>	53
Belyavsky G.I., Niconenko N.D. <i>Computation algorithm of arbitrage free price of financial commitment based on up to state sampling of Levy processes</i>	56
Mazin V.D. <i>A presentation of physical quantity in the pseudo-Euclidean plane</i>	59
Chernorytsky I.G. <i>Relaxation function of gradient methods</i>	66
Burlov V.G., Zenina E.A., Matveev A.V. <i>The synthesis of the model and the methods of functioning of the system in conflict situations</i>	72
Staypshin A.A. <i>The ontologic campaign to modelling of the city infrastructure</i>	79
Khodyrev I.A., Popova S.V. <i>Searching for forks in process models</i>	82

Management in social and economic systems

Kvyatkovskaya I.Yu., Sibikina I.V. <i>The entropic approach in the problem of systemic characteristic determination of competence model</i>	89
--	----

Rybak V.A. <i>Analysis and optimization of the anthropogenic influence on the environment</i>	93
Khanova A.A. <i>Conceptual structure of business management on the basis of multiaspect modelling (on the example of cargo port)</i>	99
Kruger L.S., Kvyatkovskaya I.Yu. <i>Formalization of standard situations in problems of traffic control of public transport</i>	106
Golub Yu.A., Novikov A.O., Loginova D.A. <i>Principles of formation of database for monitoring and evaluation process of science cluster development</i>	110
<i>About the authors</i>	115
<i>Abstracts</i>	118

УДК 535.241.13:534.621.391.83.2

С.А. Рогов, Д.С. Сергеев, В.В. Скороход

УВЕЛИЧЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ-ШУМ В АКУСТООПТИЧЕСКОМ АНАЛИЗАТОРЕ СПЕКТРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АСТИГМАТИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

Для повышения дифракционной эффективности акустооптических модуляторов (АОМ), работающих на высоких частотах, используют концентрацию энергии ультразвуковой волны в узком пучке [1, 2], что требует согласования размеров этого пучка и лазерного луча, освещающего модулятор. Обычно для этой цели применяют фокусировку света с помощью цилиндрической линзы, однако, как показывают эксперименты [3], в такой системе происходит снижение отношения сигнал-шум. Для уменьшения этого эффекта в акустооптическом анализаторе спектра авторами предложено [3] использовать вынос АОМ из плоскости фокусировки, как изображено на рис. 1.

Отличие этой схемы от аналогичной без выноса АОМ из фокуса состоит в том, что плоскость фокусировки освещающего светового пучка является плоскостью пространственных частот зависимости входного сигнала от переменной y_0 , где

распределение шумов существенно шире распределения сигнала. Линзы Л2 и Л3 переносят это распределение в плоскость фотоприемника, при этом отношение сигнала к шумовому фону в плоскости фотоприемника увеличивается. Рост отношения сигнал-шум при увеличении выноса наблюдается до тех пор, пока световой пучок, освещающий АОМ, не становится шире ультразвукового.

Ниже приводится теоретическая оценка выходного отношения сигнал-шум анализатора спектра, построенного по указанной схеме для случаев с выносом и без выноса АОМ. Для упрощения расчетов модулятор считается тонким транспарантом, а шум в области первого порядка в соответствии с экспериментальными данными определяется, в основном, аддитивным входным шумом от светового пучка нулевого порядка. Этот шум будем считать стационарным, с нулевым средним значением [4].

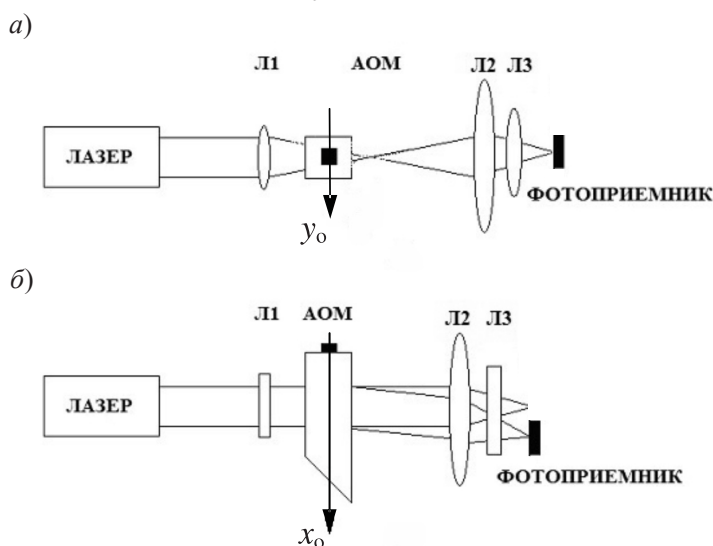


Рис. 1. Акустооптический анализатор спектра с выносом АОМ из фокуса цилиндрической линзы

1. Преобразования когерентного оптического сигнала в астигматической оптической системе

Основные соотношения при распространении когерентного светового пучка света в системах оптической обработки получены для сферической оптики. Эти результаты могут использоваться и в оптических схемах с цилиндрическими линзами, если оптический сигнал на входе системы является функцией с разделяющимися переменными [5, 6]. Однако при расчете прохождения через астигматическую оптическую систему двумерных случайных сигналов, для которых данное условие не выполняется, требуется дополнительное теоретическое рассмотрение, приведенное в данном разделе статьи. На основе предложенного подхода в разделах 1 и 2 проводится расчет отношения сигнал-шум в анализаторе спектра.

В случае входного сигнала с разделяющимися переменными, учитывая, что воздействие на оптический сигнал участка свободного пространства, а также сферических и цилиндрических линз независимо по двум ортогональным координатам, двумерный выходной сигнал можно получить перемножением одномерных выходных сигналов по ортогональным координатам [6].

Так, при распространении света в свободном пространстве на расстояние d от плоскости (x, y) до плоскости (ξ, η) для входной функции с разделяющимися переменными $U(x, y) = U_1(x)U_2(y)$, выходной сигнал можно представить в виде

$$V(\xi, \eta) = V_1(\xi)V_2(\eta),$$

где

$$\begin{aligned} V_1(\xi) &= \sqrt{\frac{i}{\lambda d}} e^{-i\frac{kd}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} U_1(x) e^{-i\frac{\pi}{\lambda d}(\xi-x)^2} dx; \\ V_2(\eta) &= \sqrt{\frac{i}{\lambda d}} e^{-i\frac{kd}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} U_2(y) e^{-i\frac{\pi}{\lambda d}(\eta-y)^2} dy, \end{aligned} \quad (1)$$

где i – мнимая единица; λ – длина световой волны. Произведение этих функций равно известному выражению для двумерных распределений.

Для схемы, осуществляющей преобразование Фурье с помощью сферической линзы, в которой входная плоскость (x, y) расположена на расстоянии d_0 перед линзой, а выходной сигнал наблюдается в фокальной плоскости (ξ, η) , расположенной на расстоянии f позади линзы, выходной сигнал можно представить в виде

$$V(\xi, \eta) = V_1(\xi)V_2(\eta),$$

где

$$\begin{aligned} V_1(\xi) &= \sqrt{\frac{i}{\lambda f}} e^{-i\frac{k(d+f)}{2}} e^{i\frac{\pi}{\lambda f}(\frac{d_0}{f}-1)\xi^2} \int_{-\infty}^{\infty} U_1(x) e^{-i\frac{2\pi}{\lambda f}x\xi} dx; \\ V_2(\eta) &= \sqrt{\frac{i}{\lambda f}} e^{-i\frac{k(d+f)}{2}} e^{i\frac{\pi}{\lambda f}(\frac{d_0}{f}-1)\eta^2} \int_{-\infty}^{\infty} U_2(y) e^{-i\frac{2\pi}{\lambda f}y\eta} dy. \end{aligned} \quad (2)$$

Для схемы формирования изображения, в которой входная плоскость расположена на расстоянии d_0 перед сферической линзой, а выходная – на расстоянии d_1 позади нее, имеем:

$$V(\xi, \eta) = V_1(\xi)V_2(\eta),$$

где

$$\begin{aligned} V_1(\xi) &= \frac{1}{\sqrt{M}} U_1\left(\frac{\xi}{M}\right) e^{-i\frac{k(d_0+d_1)}{2}} e^{i\frac{k}{2d_1}\xi^2(1+\frac{1}{M})}; \\ V_2(\eta) &= \frac{1}{\sqrt{M}} U_2\left(\frac{\eta}{M}\right) e^{-i\frac{k(d_0+d_1)}{2}} e^{i\frac{k}{2d_1}\eta^2(1+\frac{1}{M})}. \end{aligned} \quad (3)$$

Запишем это выражение для увеличения $M = 1$:

$$\begin{aligned} V_1(\xi) &= U_1(\xi) e^{-ikd_1} e^{i\frac{k}{d_1}\xi^2}; \\ V_2(\eta) &= U_2(\eta) e^{-ikd_1} e^{i\frac{k}{d_1}\eta^2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Выражения (2)–(4) справедливы, если оптическая система пропускает без искажений все пространственные частоты входного сигнала.

Одномерные выходные сигналы в приведенных выражениях соответствуют преобразованию одномерных входных сигналов с помощью цилиндрической линзы (с точностью до постоянного фазового множителя, связанного с конечной толщиной линзы, который был опущен).

В общем случае, когда входной сигнал не является функцией с разделяющимися переменными, удобно представить его в виде разложения по δ -функциям, аналогично тому, как это сделано в работе [7]:

$$U(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} U(x, y') \delta(y - y') dy'. \quad (5)$$

Поскольку оптическая обработка информации – это линейная операция, можно рассмотреть воздействие на систему сигнала с разделяющимися переменными вида $U(x, y') \delta(y - y')$, а затем проинтегрировать выходной результат по параметру y' [7].

Рассмотрим применение приведенных формул для получения сигнала на выходе часто используемой системы, состоящей из сферической и цилиндрической линз, вплотную примыкающих друг к другу (рис. 2). Данная система является частью рассматриваемых в статье анализаторов спектра.

Для сигналов с разделяющимися переменными

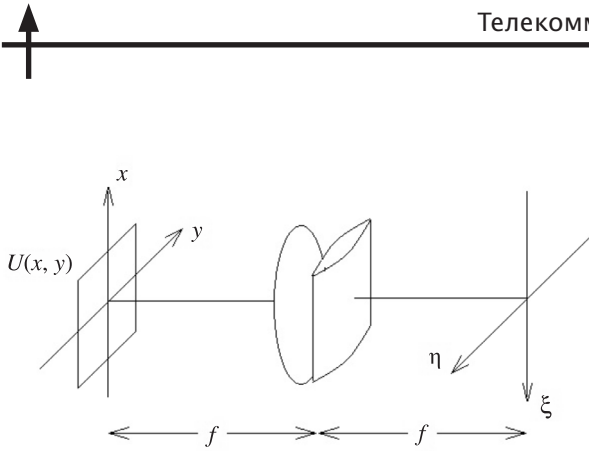


Рис. 2. Оптическая схема с расположенными рядом сферической и цилиндрической линзами

ми рассматриваемая схема осуществляет одномерное преобразование Фурье по координате x и формирование изображения по координате y . Ее выходной сигнал в этом случае можно получить, используя выражения (2) и (4):

$$V(\xi, \eta) = \sqrt{\frac{i}{\lambda f}} e^{-i2kf} e^{\frac{ik}{f}\eta^2} \int_{-\infty}^{\infty} U(x, \eta) e^{\frac{2\pi i}{\lambda f}\xi x} dx. \quad (6)$$

Покажем, используя предлагаемый подход, что в случае входного сигнала, не являющегося функцией с разделяющимися переменными, эта формула при общих условиях также справедлива.

Представив входной сигнал как линейную комбинацию функций с разделяющимися переменными по формуле (5), получим на выходе оптической системы в соответствии с принципом суперпозиции $V(\xi, \eta) = \int_{-\infty}^{\infty} L_x[U(x_0, y')] \times \times L_y[\delta(y - y')] dy'$, где L_x и L_y – операторы астигматической оптической системы, действующей независимо на распределение входного сигнала по координатам x и y . При отсутствии виньетирования оператор L_x осуществляет преобразование Фурье по координате x , а оператор L_y формирует изображение по координате y . В общем случае отклик системы, формирующей изображение по координате y на δ -функцию, равен $\phi(y)$:

$$L_y[\delta(y - y')] = \phi(\eta - y').$$

Внесем под знак оператора L_x функцию $\phi(y - y')$, не зависящую от переменной x :

$$V(\xi, \eta) = \int_{-\infty}^{\infty} L_x[U(x, y')\phi(\eta - y')] dy'. \quad (7)$$

Учитывая ограниченность размеров входного транспаранта и величины максимума в квадратных скобках, можно поменять порядок интегрирования в (7) [8]:

$$V(\xi, \eta) = L_x \left[\int_{-\infty}^{\infty} [U(x, y')\phi(\eta - y')] dy' \right]. \quad (8)$$

Интеграл по dy' представляет собой свертку двух функций, которая, как известно, равна обратному произведению Фурье от произведения спектров этих функций. Если система пропускает без искажений спектр по координате y' в пределах, превышающих ширину спектра входного сигнала, то в выражении (8) функцию ϕ можно заменить на δ -функцию, при этом на выходе получаем выражение $V(\xi, \eta) = L_x[U(x, \eta)]$, совпадающее с формулой (6).

Таким образом, если система, показанная на рис. 2, пропускает без искажений при формировании изображения все его пространственные частоты, то она осуществляет одномерное преобразование Фурье двумерного входного сигнала по вертикальной координате и формирование изображения по горизонтальной.

2. Отношение сигнал-шум в схеме без выноса АОМ

Рассмотрим отношение сигнал-шум для схемы, представленной на рис. 1, когда вынос АОМ из фокуса отсутствует ($f_0 = 0$). В этом случае схема преобразования входного оптического сигнала совпадает со схемой, показанной на рис. 2, и для нахождения выходного сигнала можно воспользоваться выражением (6).

Входной оптический сигнал первого порядка в плоскости АОМ будем считать равным $|E_0| P_X(x) \sqrt{\theta} e^{\frac{2\pi i \xi_0 x}{\lambda f}} U_{2\text{норм}}(y)$, где (x, y) – координаты входной плоскости астигматической системы, совпадающей в данном случае с плоскостью АОМ; $|E_0|$ – максимальная величина амплитуды света, освещающего модулятор; $P_X(x)$ – функция пропускания входной апертуры по оси x (окно шириной X); θ – дифракционная эффективность модулятора; $\frac{\xi_0}{\lambda f}$ – пространственная частота гармонического входного сигнала; $U_{2\text{норм}}(y)$ – нормированная на максимум спадающая функция в фокусе собирающей цилиндрической линзы, которая определяет распределение по оси y амплитуды света, освещающего АОМ.

Из выражения (6) имеем на выходе системы, с точностью до фазового множителя:

$$V_{\text{вых}}(\xi, \eta) = \frac{\sqrt{\theta}}{\sqrt{\lambda f}} |E_0| X \times \times U_{2\text{норм}}(\eta) \frac{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda f} X(\xi - \xi_0)\right)}{\frac{\pi}{\lambda f} X(\xi - \xi_0)}.$$

Отсюда получаем интенсивность сигнала в максимуме дифракционного порядка:

$$I_{c \max} = \frac{9}{\lambda f} |E_0|^2 X^2. \quad (9)$$

Интенсивность шумового фона на выходе можно найти аналогично тому, как это было сделано в работе [9]. При этом получается следующее выражение:

$$I_{\Phi}(\xi, \eta) = \sigma^2(\xi, \eta) = |E_0|^2 \frac{X}{\lambda f} W_{nx} \left(\frac{2\pi\xi}{\lambda f} \right) U_{2 \text{ норм}}^2(\eta),$$

где $\sigma^2(\xi, \eta)$ – дисперсия выходного шума;

$W_{nx} \left(\frac{2\pi\xi}{\lambda f} \right) = \int_{-\infty}^{\infty} K(\Delta x, 0) e^{-i \frac{2\pi}{\lambda f} \Delta x} d(\Delta x)$ – одномерное (по оси ξ) распределение энергетического спектра входного шума; $K(\Delta x, \Delta y)$ – корреляционная функция входного шума.

Для сравнения результатов вычислений отношения сигнал-шум удобно нормировать распределение энергетического спектра на его максимум, равный $\Delta_k \sigma_n^2$, где Δ_k – ширина корреляционной функции входного шума; σ_n^2 – его дисперсия. Для фона в точке максимального сигнала ($\xi = \xi_0$, $\eta = 0$) при этом получаем:

$$I_{\Phi} \approx |E_0|^2 \frac{X}{\lambda f} \Delta_k \sigma_n^2 W_{nx \text{ норм}} \left(\frac{2\pi\xi_0}{\lambda f} \right). \quad (10)$$

Из выражений (9) и (10) получаем отношение сигнал-шум на выходе для схемы анализатора спектра без выноса АОМ:

$$\frac{I_{c \max}}{I_{\Phi}} = \frac{\vartheta X}{\sigma_n^2 \Delta_k W_{nx \text{ норм}} \left(\frac{2\pi\xi_0}{\lambda f} \right)}. \quad (11)$$

3. Отношение сигнал-шум в схеме с выносом АОМ

Входной сигнал первого порядка в плоскости модулятора (x_0, y_0) в данном случае может быть записан как

$$U(x_0, y_0) = |E_0| P_X(x_0) \sqrt{9} e^{i \frac{2\pi\xi_0 x_0}{\lambda f}} P_Y(y_0) e^{i \frac{\pi y_0^2}{\lambda f_0}}, \quad (12)$$

где f_0 – вынос звукового столба АОМ из плоскости фокусировки лазерного луча цилиндрической линзой Л1; $P_X(x_0)$ и $P_Y(y_0)$ – функции пропускания апертуры.

Действие квадратичного фазового множителя $e^{i \frac{\pi y_0^2}{\lambda f_0}}$ эквивалентно установке цилиндрической линзы с фокусным расстоянием f_0 непосредственно за

АОМ при его освещении плоской волной с амплитудой $|E_0|$. Полагая, что используется именно такая схема, представляем ее входной сигнал в виде интеграла от произведения функций с разделяющимися переменными $U(x_0, y_0) = U_1(x_0) U_2(y_0)$,

где $U_1(x_0) = P_X(x_0) \sqrt{9} |E_0| e^{i \frac{2\pi\xi_0 x_0}{\lambda f}}$, $U_2(y_0) = P_Y(y_0)$.

Отклик системы на входной сигнал $U_1(x_0)$ будет таким (см. (2)):

$$V_1(\xi) = \sqrt{\frac{i}{\lambda f}} X \sqrt{9} |E_0| e^{-i \frac{k(d_0+f)}{2}} e^{i \frac{\pi}{\lambda f} \frac{d_0}{f} \xi^2} \times \sin \left(\frac{\pi}{\lambda f} X(\xi - \xi_0) \right) \times \frac{\pi}{\lambda f} X(\xi - \xi_0). \quad (13)$$

Находим отклик в задней фокальной плоскости входной цилиндрической линзы Л1 на входной сигнал $U_2(y_0)$:

$$U'_2(y) = \sqrt{\frac{i}{\lambda f_0}} Y e^{-i \frac{k f_0}{2}} e^{-i \frac{\pi}{\lambda f_0} y^2} \frac{\sin \left(\frac{\pi y}{\lambda f_0} Y \right)}{\frac{\pi y}{\lambda f_0} Y}.$$

Линзы Л2 и Л3 переносят это распределение в выходную плоскость системы с единичным увеличением в соответствии с выражением (4).

С точностью до фазового множителя выходной отклик по оси η будет

$$V_2(\eta) = \frac{1}{\sqrt{\lambda f_0}} Y \frac{\sin \left(\frac{\pi}{\lambda f_0} Y \eta \right)}{\frac{\pi}{\lambda f_0} Y \eta}. \quad (14)$$

Распределение сигнала в выходной плоскости по двум координатам, с точностью до фазового множителя, определяем через произведение (13) и (14):

$$V(\xi, \eta) = \frac{XY}{\lambda \sqrt{f f_0}} \sqrt{9} |E_0| \times \sin \left(\frac{\pi}{\lambda f} X(\xi - \xi_0) \right) \sin \left(\frac{\pi}{\lambda f_0} Y \eta \right) \times \frac{\pi}{\lambda f} X(\xi - \xi_0) \frac{\pi}{\lambda f_0} Y \eta.$$

Отсюда получаем интенсивность сигнала в максимуме:

$$I_{c \max} = \frac{9 X^2 Y^2}{\lambda^2 f f_0} |E_0|^2. \quad (15)$$

Находим теперь распределение интенсивности шумового фона в выходной плоскости системы $I_\phi(\xi, \eta)$. Шум во входной плоскости представляем в виде интеграла от функции с разделяющимися переменными (см. (5)):

$$\begin{aligned} U(x_0, y_0) &= |E_0| P_X(x_0) P_Y(y_0) n(x_0, y_0) = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} |E_0| P_X(x_0) P_Y(y') n(x_0, y') \delta(y_0 - y') dy' = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} U_1(x_0, y') \cdot U_2(y_0, y') dy', \end{aligned}$$

где $U_1(x_0, y') = |E_0| P_X(x_0) n(x_0, y')$; $U_2(y_0, y') = P_Y(y') \delta(y_0 - y')$.

Находим выходной отклик системы по координате ξ на входной сигнал $U_1(x_0, y')$ (см. (2)):

$$\begin{aligned} V_1(\xi, y') &= \sqrt{\frac{i}{\lambda f}} |E_0| e^{-\frac{(d_0 + f)k}{2}} e^{i\frac{\pi}{\lambda f} \left(\frac{d_0}{f} - 1\right) \xi^2} \times \\ &\times \int_{-\frac{x}{2}}^{\frac{x}{2}} n(x, y') e^{-\frac{2\pi i x \xi}{\lambda f}} dx. \end{aligned} \quad (16)$$

Отклик в плоскости фокусировки лазерного луча линзой Л1 по координате y на сигнал $U_2(y_0, y')$ находим, используя теорему смещения для преобразования Фурье от δ -функции:

$$U'_2(y, y') = \sqrt{\frac{i}{\lambda f_0}} P_Y(y') e^{-\frac{f_0 k}{2}} e^{-i\frac{\pi}{\lambda f_0} y^2} e^{-\frac{2\pi i y y'}{\lambda f_0}}.$$

Выражение для выходного отклика по координате η на входной сигнал $U_2(y_0, y')$ получаем из распределения $U'_2(y, y')$, как его изображение, формируемое с помощью линз Л2 и Л3 (см. (4)). С точностью до фазового множителя, не зависящего от y , оно равно

$$V_2(\eta, y') = \frac{1}{\sqrt{\lambda f_0}} P_Y(y') e^{-\frac{2\pi i \eta y'}{\lambda f_0}}. \quad (17)$$

Зависимость шума на выходе от двух координат с точностью до фазового множителя получаем из (16) и (17), проинтегрировав отклик системы по всем y' :

$$\begin{aligned} V(\xi, \eta) &= \int_{-\infty}^{\infty} V_1(\xi, y') V_2(\eta, y') dy' = \\ &= \frac{|E_0|}{\lambda \sqrt{f_0 f}} \cdot \int_{-\frac{x}{2}}^{\frac{x}{2}} dx e^{-\frac{2\pi i x \xi}{\lambda f}} \times \\ &\times \int_{-\infty}^{\infty} P_Y(y') n(x, y') e^{-\frac{2\pi i \eta y'}{\lambda f_0}} dy' = \end{aligned} \quad (18)$$

$$= \frac{|E_0|}{\lambda \sqrt{f_0 f}} \int_{-\frac{x}{2}}^{\frac{x}{2}} \int_{-\frac{y}{2}}^{\frac{y}{2}} n(x, y) e^{-\frac{2\pi i x \xi}{\lambda f}} e^{-\frac{2\pi i \eta y}{\lambda f_0}} dx dy.$$

Из выражения (18) следует, что среднее значение шума в выходной плоскости $V(\xi, \eta) = 0$, поскольку $n(x, y) = 0$.

Корреляционная функция случайного процесса в выходной плоскости определяется следующим выражением:

$$K_{\text{вых}}(\xi_1, \xi_2, \eta_1, \eta_2) = V(\xi_1, \eta_1) V^*(\xi_2, \eta_2).$$

Учитывая, что при стационарном процессе на входе $n(x, y)$ его корреляционная функция зависит только от разности координат $(x_1 - x_2, y_1 - y_2)$, получаем:

$$\begin{aligned} K_{\text{вых}}(\xi_1, \xi_2, \eta_1, \eta_2) &= \\ &= \frac{|E_0|^2}{\lambda^2 f_0 f} \int_{-\frac{x}{2}}^{\frac{x}{2}} \int_{-\frac{y}{2}}^{\frac{y}{2}} e^{i\left(\frac{2\pi}{\lambda f} \xi_1 x_2 + \frac{2\pi}{\lambda f_0} \eta_2 y_2\right)} dx_2 dy_2 \times \\ &\times \int_{-\frac{x}{2}}^{\frac{x}{2}} \int_{-\frac{y}{2}}^{\frac{y}{2}} K_n(x_1 - x_2, y_1 - y_2) e^{-i\left(\frac{2\pi}{\lambda f} \xi_1 x_1 + \frac{2\pi}{\lambda f_0} \eta_1 y_1\right)} dx_1 dy_1. \end{aligned} \quad (19)$$

Второй интеграл в выражении (32) можно упростить, если область корреляции входного процесса, т. е. ширина функции $K_n(x_1 - x_2, y_1 - y_2)$ значительно меньше размера сигнала XY [4]. Тогда этот интеграл будет равен энергетическому спектру входного случайного процесса $W_n\left(\frac{2\pi}{\lambda f} \xi_1, \frac{2\pi}{\lambda f_0} \eta_1\right)$. При этом получаем из (19):

$$\begin{aligned} K_{\text{вых}}(\xi_1, \xi_2, \eta_1, \eta_2) &= \\ &= \frac{|E_0|^2}{\lambda^2 f_0 f} W_n\left(\frac{2\pi}{\lambda f} \xi_1, \frac{2\pi}{\lambda f_0} \eta_1\right) \frac{\sin\left(\frac{x\left(\frac{2\pi}{\lambda f} \xi_1 - \frac{2\pi}{\lambda f} \xi_2\right)}{2}\right)}{x\left(\frac{2\pi}{\lambda f} \xi_1 - \frac{2\pi}{\lambda f} \xi_2\right)} \times \\ &\times \frac{\sin\left(\frac{x\left(\frac{2\pi}{\lambda f_0} \eta_1 - \frac{2\pi}{\lambda f_0} \eta_2\right)}{2}\right)}{x\left(\frac{2\pi}{\lambda f_0} \eta_1 - \frac{2\pi}{\lambda f_0} \eta_2\right)}. \end{aligned}$$

Поскольку среднее значение процесса на выходе равно нулю, то средняя интенсивность фона может быть найдена, как

$$I_{\phi} = K_{\text{вых}}(\xi_1, \xi_2, \eta_1, \eta_2) = \frac{|E_0|^2 X Y}{\lambda^2 f_0 f} W_n \left(\frac{2\pi}{\lambda f} \xi, \frac{2\pi}{\lambda f_0} \eta \right).$$

Вводя, аналогично предыдущему, нормировку энергетического спектра на его максимум, равный $\sigma_n^2 \cdot \Delta_k^2$, получаем для интенсивности фона:

$$I_{\phi} \approx \frac{|E_0|^2 X Y}{\lambda^2 f_0 f} W_{\text{норм}} \left(\frac{2\pi}{\lambda f} \xi, \frac{2\pi}{\lambda f_0} \eta \right) \sigma_n^2 \Delta_k^2, \quad (20)$$

где $W_{\text{норм}}$ – нормированный энергетический спектр ($W_{\text{норм}}(0,0) = 1$).

Отношение сигнал-шум в максимуме сигнала находим из (15) и (20):

$$\frac{I_{c \text{ max}}}{I_{\phi}} = \frac{X Y \vartheta}{W_{\text{норм}} \left(\frac{2\pi}{\lambda f} \xi_0, 0 \right) \sigma_n^2 \Delta_k^2}. \quad (21)$$

4. Обсуждение результатов

Значение нормированных функций в выражениях (11) и (21) $W_{\text{лх норм}}$ и $W_{\text{л норм}}$ совпадают, откуда следует, что отношение сигнал-шум в схеме

анализатора спектра с выносом АОМ из фокуса цилиндрической линзы выше, чем в схеме без выноса АОМ в $\frac{Y}{\Delta_k}$ раз. Это объясняется тем, что шум в плоскости регистрации схемы с выносом АОМ распределен по оси η в $\frac{Y}{\Delta_k}$ раз шире, чем сигнал, а в схеме без выноса шум и сигнал как во входной, так и в выходной плоскости распределены на одном участке оси. По оси ξ в обеих схемах распределение шума шире, чем распределение сигнала в $\frac{Y}{\Delta_k}$ раз. Увеличение площади распределения шума при той же его энергии приводит к снижению его плотности мощности и увеличению отношения сигнал-шум.

Результаты экспериментальных исследований, описанные в работе [3], подтверждают приведенные выше теоретические выводы. Полученные формулы отношения сигнал-шум могут использоваться при расчете чувствительности и динамического диапазона рассмотренных схем. Предложенная методика расчета может применяться для исследования не только акустооптических анализаторов спектра, но и других когерентных астигматических оптических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Янг, Э. Расчет акустооптических устройств [Текст] / Э. Янг, ЯО Шикай // ТИИЭР. –1981. –Т. 69. –№ 1. –С. 62–74.
2. Зюрюкин, Ю.А. Дефлекторы лазерного пучка для акустооптической обработки радиосигналов [Текст] / Ю.А. Зюрюкин, С.В. Заварин, Л.А. Шехтман // Проблемы оптической физики: Матер. VI Междунар. молодежной науч. шк. по оптике, лазерной физике и биофизике. –Саратов: ГосУНЦ «Колледж». –2003. –С. 38–43.
3. Рогов, С.А. Увеличение отношения сигнал-шум широкополосных акустооптических устройств [Текст] / С.А. Рогов, Д.С. Сергеев, В.В. Скороход // Сб. докладов XXI Междунар. конф. Лазеры. Измерения. Информатика. –СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2011. –Т. 1. –С. 268–279.
4. Кондратенков, Г.С. Обработка информации когерентными оптическими системами [Текст] / Г.С. Кондратенков. –М.: Сов. радио, 1972. –208 с.
5. Marks, R. Astigmatic coherent processor analysis [Text] / R. Marks, S. Bell // Opt. Eng. –1978. –Vol.17. –№ 2. –P. 167–169.
6. Тарасов, Л.В. Когерентнооптическая обработка радиосигналов [Текст] / Л.В. Тарасов, В.А. Ежов // Зарубежная электроника. –1980. –№ 2. –С. 3–36.
7. Гудмен, Дж. Введение в фурье-оптику [Текст] / Дж. Гудмен. –М.: Мир, 1970. –364 с.
8. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике [Текст] / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. –М., 1967. –608 с.
9. Рогов, С.А. Прохождение случайного сигнала через астигматическую оптическую систему [Текст] / С.А. Рогов, И.А. Водоватов // Автометрия, 1986. –№ 1. –С.86–87.

ВЫЧИСЛЕНИЕ КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СХЕМЫ ШИФРОВАНИЯ ДВУМЕРНЫХ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ tent-ОТОБРАЖЕНИЯ

Для стандартного алгоритма шифрования изображений с помощью хаотического отображения типа tent предлагается алгоритм расчета размера кластеров ключей как функции параметра симметрии отображения и числа раундов преобразования на каждом шаге схемы шифрования. При этом особый интерес представляет описание границ кластеров ключей или получение метрики, позволяющей определить принадлежность ключей к одному и тому же кластеру, что принципиально необходимо при анализе устойчивости схемы к криптоанализу. Результаты, полученные в статье, могут применяться для нахождения оптимального соотношения параметров схемы шифрования по критериям быстродействия, длины ключа и числа возможных ключей как обратной функции от размера кластера, при проектировании криптосистемы на основе методов динамического хаоса с использованием рассмотренного или аналогичного алгоритма шифрования в каждом частном случае.

Постановка задачи определения числа кластеров как функции параметров отображения и числа раундов хаотического преобразования

При обработке изображения используется стандартный подход – производится попиксельная перенормировка точек изображения к диапазону $[0,1]$, далее следует блок шифрования, после которого выполняется обратное преобразование точек для получения зашифрованного изображения. Блок шифрования производит криптографическое преобразование путем применения хаотического отображения вида $\{x : \mathcal{R}_1 \rightarrow \mathcal{R}_1\}$:

$$x_{n+1} = \begin{cases} \frac{x_n}{\mu}, x_n < \mu \\ \frac{1-x_n}{1-\mu}, x_n > \mu \end{cases}, \quad (1)$$

где $0 < \mu < 1$ – параметр симметрии.

Определим число возможных ключей шифрования и размер кластера Q как функцию параметра симметрии tent-отображения и числа раундов N . В отличие от [1], где $\mu = \text{const}$, рассмотрим преимущества изменения μ в процессе шифрования. Естественным критерием разграничения ключей шифрования является возможность/невозможность восстановления изображения [1]. Однако данный эмпирический критерий, будучи необходимым, не может считаться достаточным условием криптостойкости схемы шифрования. Требуется доказать принципиальную невозможность расшифровки изображения, чтобы с достаточным основанием отнести ключи к различным кластерам. Доказательство достаточности будет рассмотрено в следующих работах, что же касается доказательства необходимости, то будем основывать понятие «читаемости изображения» на пороговом значении взаимной корреляции C_{xy} открытых и зашифрованных данных. Значение этого порога играет роль граничного параметра при расчете размера кластера. Выбор шага изменения параметра симметрии μ определяется из соображений необходимого быстродействия и при необходимости в исследовательских задачах может меняться плавно с точностью до 10^{-52} . Дополнительное увеличение количества ключей может быть достигнуто с использованием псевдослучайной последовательности или хаотиче-

ского отображения как применяемых до и после шифрования к изображению, так и введенных в схему модификации параметра симметрии μ . Для этого в схему шифрования вводится еще один блок, который, в зависимости от реализации, может изменять параметр симметрии μ следующим образом:

$$\mu = \mu(a, b, \eta), \quad (2)$$

где $\mu(a, b, \eta)$ – результат применения η итераций некоторого одномерного хаотического отображения (например, отображения пекаря) с параметрами a и b

$$\mu = \mu + k * \text{rand}(n), \quad (3)$$

где $0 < k < 1$ – коэффициент скорости изменения параметра, $\text{rand}(n)$ – вектор псевдослучайных значений

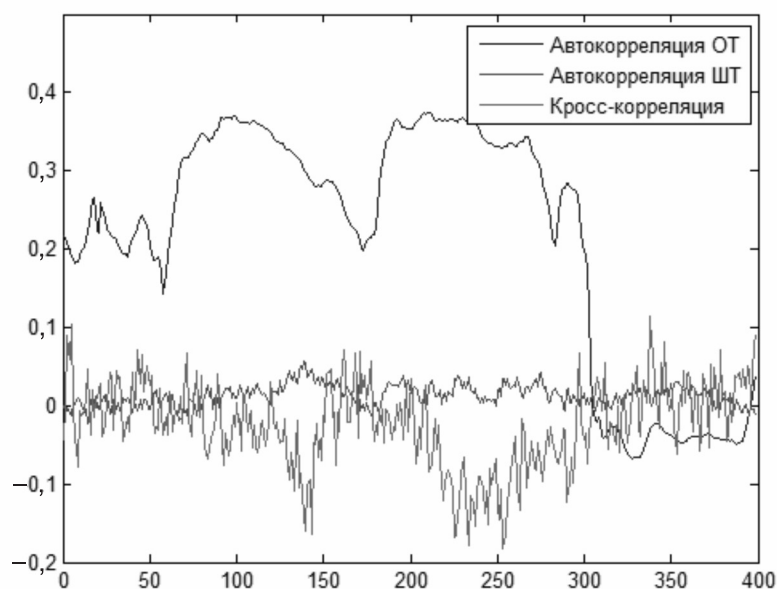


Рис. 1. Шифрование с постоянным параметром $\mu = 0,5$

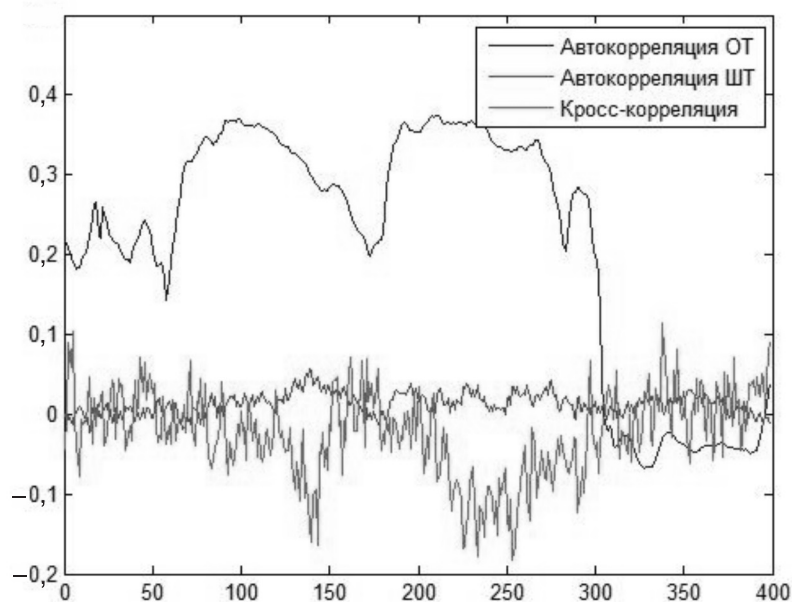


Рис. 2. Шифрование при случайном изменении параметра μ в каждом раунде шифрования

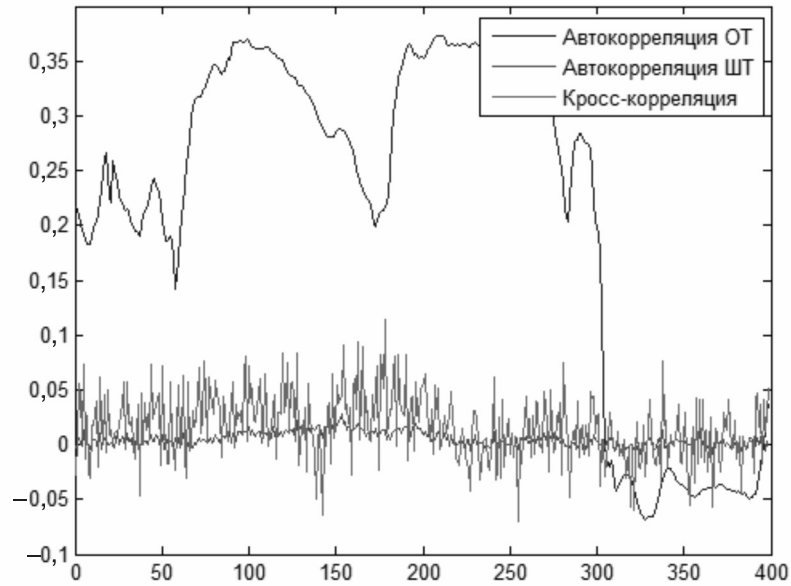


Рис. 3. Шифрование при случайном изменении параметра μ от точки к точке шифруемого изображения

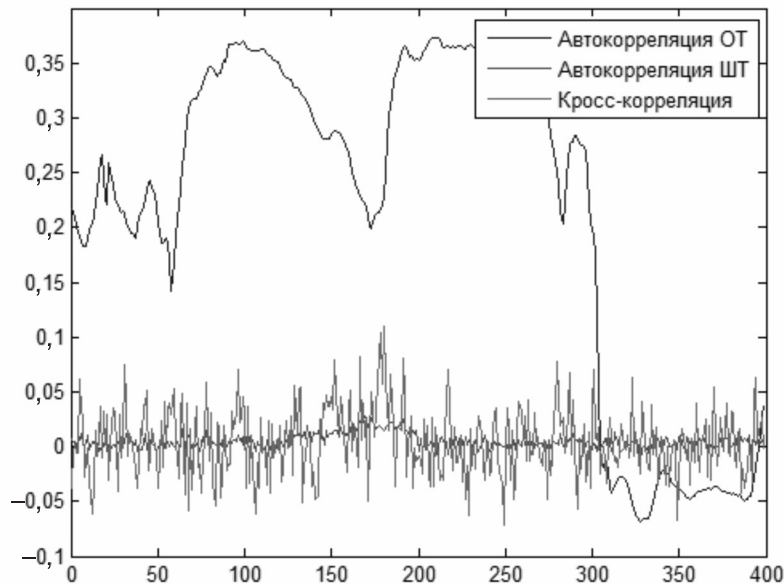


Рис. 4. Шифрование в течение $N = 50$ с постоянным параметром $\mu = 0,5$

$$\mu = \mu + k * \text{rand}(i, j, n), \quad (4)$$

где $0 < k < 1$ – коэффициент скорости изменения параметра, $\text{rand}(i, j, n)$ – матрица псевдослучайных значений. При использовании соотношений (2) и (3) параметр μ изменяется только в пределах шага шифрования, при модификации параметра в соответствии с (4) достигается изменение параметра от точки к точке шифруемого изображения

в пределах шага. Результаты моделирования показывают, что при одинаковом количестве шагов шифрования (рис. 1–4) $N = 10$ лучший результат дает модификация параметра симметрии от точки к точке (рис. 3). На рис. 4 приведены результаты моделирования при $N = 50$.

Время работы алгоритма при моделировании во всех вариантах реализации отличается незна-

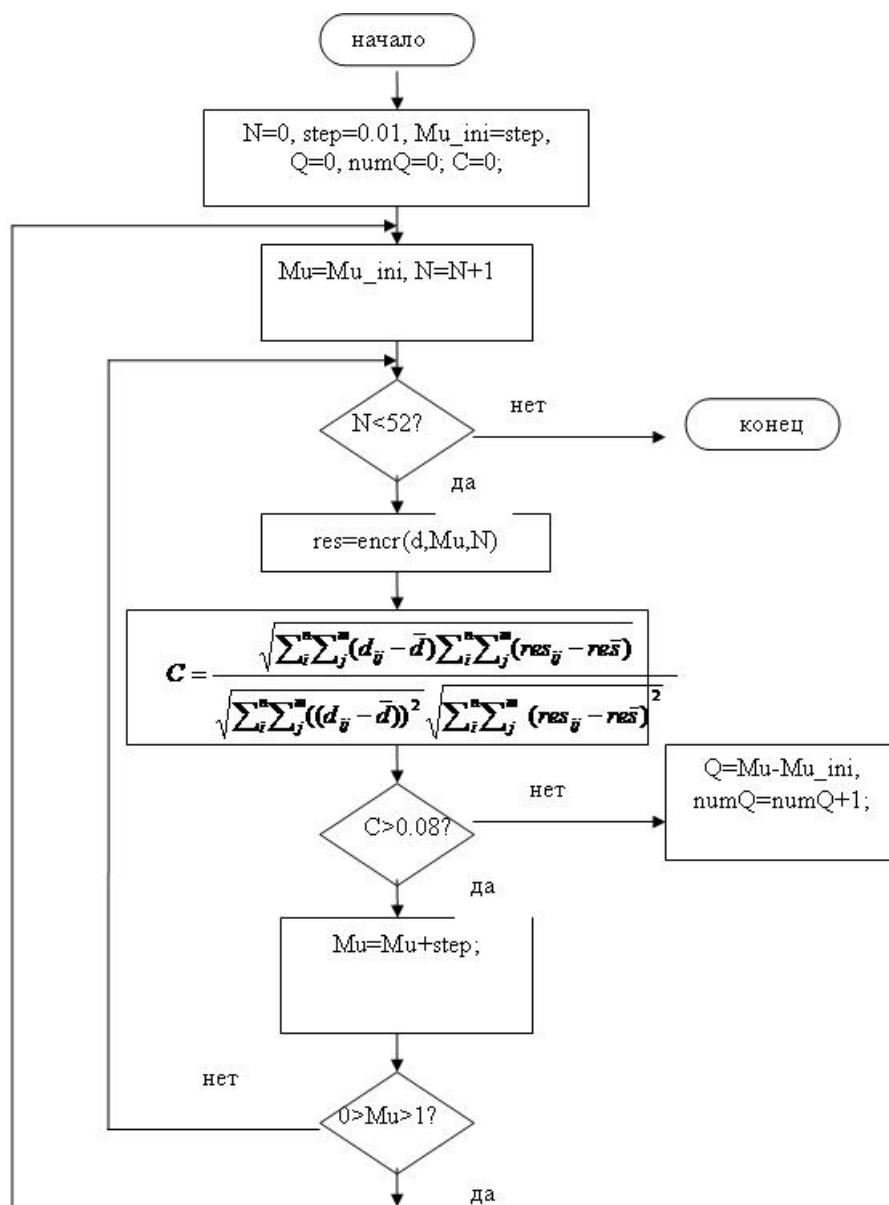


Рис. 5. Схема алгоритма вычисления количественных характеристик алгоритма: размера кластера Q, числа кластеров numQ в зависимости от значения числа повторений шага отображения N и параметра tent-отображения μ

чительно и составляет около 22 с. Эта оценка очень приблизительная. Содержательным является лишь отсутствие ощутимой разницы во времени работы.

Определение количественных характеристик алгоритма шифрования. Алгоритм вычисления размеров кластеров ключей

Исследуем работу схемы с повторениями на основе нелинейного подмешивания [1], в которой

отображение (1) выступает в роли функции шифрования. В качестве информационного сигнала используем изображение. Как и раньше, размер кластеров ключей определяется по степени корреляции между исходным и восстановленным изображениями. При значениях корреляции менее 8 % положим эмпирически, что восстановленное изображение не поддается визуальной идентификации. Положим изменение шага равным 0,01. Данный алгоритм отличается универсаль-



ностью, поскольку легко адаптируется к прочим видам хаотических отображений, используемых в криптографии (рис. 5) [3]. Основной операцией, определенной в алгоритме, является вычисление корреляционного коэффициента C , на основании сравнения которого с эмпирическим порогом делается вывод о степени различия оригинального и зашифрованного изображений. В случае схожести изображений в пределах эмпирического порога выполняется обновление параметров шифрования. Превышение порога распознавания означает выход за пределы кластера ключа и открытие нового кластера.

Предложен алгоритм получения численных оценок схемы шифрования на основе tent-отоб-

ражения, позволяющий построить все кластеры ключей для заданного параметра отображения μ и числа раундов N . Ограничение на число раундов и плавность изменения параметра симметрии обусловлено длиной мантиссы двоичного представления действительного числа на конечной разрядной сетке вычислителя и составляет 52 двоичных разряда. В дальнейшем планируется применить для определения границ кластеров технологии искусственного интеллекта для классификации «на лету» (или «без учителя»), в частности, использовать тесты схожести теории адаптивного резонанса. Существенную проблему будущих исследований представляет доказательство достаточной криптостойкости схем шифрования на основе хаотических отображений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Богач, Н.В.** Проблема малого количества ключей в алгоритме шифрования двумерных данных на основе tent-отображения [Текст] / Н.В. Богач, В.А. Чупров, В.Н. Шашихин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. –2012. –№2.
2. **Дмитриев, А.С.** Динамический хаос: новые носи-

тели информации для систем связи [Текст] / А.С. Дмитриев, А.И. Панас. –М.: Физматлит, 2002. –252 с.

3. **Кузнецов, С.П.** Динамический хаос [Текст] / С.П. Кузнецов. –М.: Физматлит, 2006. –356 с.

4. **Птицын, Н.** Приложение теории детерминированного хаоса в криптографии [Текст] / Н. Птицын. –М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002. –80 с.

УДК 681.51

С.Ф. Бурдаков, Н.А. Харалдин

ПЛАНИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОГРАММНЫХ ДВИЖЕНИЙ РОБОТОВ МЕТОДОМ КОНФИГУРАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА

Проблема использования роботов в чрезвычайных ситуациях, включая космические применения, становится все более актуальной [1]. Сложность и многовариантность решений задач, возникающих при этом, во многом связана с необходимостью выбора траекторий безопасного движения роботов в условиях внешней среды с препятствиями. Современный уровень развития робототехники пока не позволяет решать эти задачи в автоматическом режиме, т. е. без участия оператора [1]. Оператор, используя информацию о текущем состоянии внешней среды, а также накопленный опыт управления роботами в подобных ситуациях, может существенно снизить уровень неопределенности при планировании и

оптимизации траекторий безопасного движения и тем самым сократить временные, приборно-технические и вычислительные затраты на решение подобных задач.

В настоящей статье описываются алгоритмы, позволяющие оператору активно участвовать в принятии решений и формировании в реальном времени управляющих воздействий для роботов, функционирующих в среде с препятствиями. Предлагаемые алгоритмы базируются на методе конфигурационного пространства [2].

Постановка задачи

Рассматривается задача синтеза с участием оператора программных законов движения в

шарнирах робота, обеспечивающих выполнение той или иной технологической операции в стесненных условиях. Программные законы должны быть реализуемы с точки зрения имеющихся ограничений и скоординированы так, чтобы не происходило соударений с препятствиями в рабочем пространстве робота.

Предполагается, что имеется априорная информация в виде конструктивных параметров робота, позволяющая рассчитывать в опорной системе координат для любой точки конструкции в общем случае шестимерный вектор координат и ориентации соответствующего элемента конструкции через обобщенные координаты, характеризующие перемещения в шарнирах. В частности, если ввести полюс p схвата (рабочего инструмента), то такое соотношение будет иметь вид

$$r_p = \varphi(q), \quad (1)$$

где $r_p = [x_p, y_p, z_p, \alpha, \beta, \gamma]^T$ – вектор, содержащий три координаты полюса x_p, y_p, z_p и три угла (направляющих косинуса) α, β, γ , определяющих ориентацию схвата относительно опорной системы координат; $q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$ – n -мерный вектор обобщенных координат робота, представляющих собой относительные перемещения в поступательных или вращательных шарнирах.

Предполагается также, что в распоряжении оператора имеется цифровая 3D-поверхность трехмерной модели сцены рабочего пространства, построенная путем специальной обработки видовой информации, поступающей от системы технического зрения [3]. Трехмерная модель содержит пространственные контуры препятствий и привязку опорной системы координат робота. Оператор может вносить в эту модель целеуказания для робота, соответствующие технологической операции, например, координаты и углы подхода схвата к конечной точке, траекторию движения от начальной точки к конечной и ориентацию схвата вдоль нее и т. д.

Задача прокладки маршрута в трехмерной модели сцены рабочего пространства робота может быть решена многими способами [4, 5]. Основная трудность состоит в том, чтобы пересчитать маршрут схвата многозвенного робота в безопасные законы изменения обобщенных координат, при которых отсутствуют столкновения с препятствиями не только схвата, но и любого другого элемента конструкции робота.

Вернемся к соотношению (1), которое определяет суть так называемой *прямой задачи о положении робота* [5]. Эта задача для заданной конфигурации робота всегда имеет единственное решение. Однако при синтезе программных законов движения в шарнирах требуется решить обратную к (1) задачу, в большинстве случаев имеющую множество решений. Введение в рассмотрение критерия безопасности еще больше осложняет эту и без того непростую задачу. Поэтому в отличие от традиционного подхода, базирующегося на том или ином методе решения обратной задачи, предлагается другой подход к синтезу программных законов движения, основанный на решении множества прямых задач о положении робота типа (1) и активном участии оператора в выборе из этого множества решений, соответствующих поставленным требованиям.

Объективным критерием безопасности может служить минимальное расстояние от элементов конструкции робота до препятствий в течение всего времени движения. В этом случае участие оператора в процессе синтеза безопасных траекторий движения робота в среде с препятствиями при наличии визуализации только в виде трехмерной модели сцены рабочего пространства представляет собой весьма сложную задачу. Поэтому в экстремальной робототехнике для приобретения и закрепления у операторов навыков дистанционного управления разрабатываются специализированные имитационно-тренажерные комплексы, позволяющие контролировать в реальном времени качество выполнения работ [6].

Основные этапы решения задачи

Конкретизируем постановку и в качестве одной из возможных рассмотрим задачу перевода робота из заданной начальной конфигурации q_0 в заданную конечную конфигурацию q_T , которые устанавливаются оператором в трехмерной модели сцены рабочего пространства. Синтез программных законов движения $q^r = q^r(t)$, $t \in [0, T]$, $q^r(0) = q_0$, $q^r(T) = q_T$ будем осуществлять на классе полиномиальных функций с учетом критерия безопасности при следующих ограничениях:

$$\begin{aligned} &\text{конструктивных } q \leq q \leq \bar{q}; \\ &\text{кинематических } |\dot{q}| \leq \dot{q}, \quad |\ddot{q}| \leq \ddot{q}; \end{aligned}$$

геометрических, соответствующих принятым условиям обхода пространственных препятствий.



Решение задачи осуществляется в несколько этапов.

1. Построение свободных зон в конфигурационном пространстве. В n -мерном конфигурационном пространстве строится сетка, каждый узел которой соответствует той или иной конфигурации робота. В опорной системе координат, связанной с трехмерной моделью сцены рабочего пространства, решается множество прямых задач для дискретных значений обобщенных координат из диапазонов $\underline{q}_i \leq q_i \leq \bar{q}_i$, $i = \overline{1, n}$. Наличие в трехмерной модели пространственных контуров препятствий, заданных в той же опорной системе координат, приводит к появлению запретных конфигураций. Что в свою очередь позволяет построить в n -мерном конфигурационном пространстве запретные области и области, свободные от коллизий, проекции которых на координатные плоскости (q_i, q_j) $i, j = \overline{1, n}$ представляют собой так называемые *карты столкновений*. Заметим, что карты столкновений строятся с учетом пространственных контуров элементов конструкции робота, которые так же как контуры препятствий представляются набором геометрических объектов типа эллипсоидов, параллелепипедов и т. п. Это позволяет достаточно легко формализовать задачу определения возможных пересечений робота с препятствиями. Таким образом, на картах столкновений можно обозначить запретные зоны и свободные зоны, в которых могут находиться искомые траектории $q^r(t)$. Задача генерации карт столкновений является универсальной и не требует сложного алгоритмического обеспечения.

2. Планирование траекторий в свободных зонах. На данном этапе оператор, используя расширенные возможности визуализации, выбирает те или иные стратегии движения в среде с препятствиями на основе эвристик различной сложности, в зависимости от характера решаемой технологической задачи. Например, оператор может указать промежуточную конфигурацию. Тогда траектория в конфигурационном пространстве будет состоять из двух участков: от начальной конфигурации к промежуточной и от промежуточной конфигурации к конечной. В качестве промежуточной конфигурации может быть выбрана минимальная конфигурация, при которой робот занимает минимальный объем в рабочем пространстве. Тогда движение разбивается на три стадии: от начальной конфигурации к минимальной, поворот механизма в минимальной конфи-

гурации и переход в конечную конфигурацию. Другая стратегия движения может определять последовательность движения по различным степеням подвижности и т. д.

3. Расчет и оптимизация траекторий. Рассмотрим случай, когда синтез программных движений $q_i^r(t)$, $i = \overline{1, n}$ осуществляется на классе типовых законов «разгон – движение с постоянной скоростью – торможение». Определению подлежат следующие параметры: время разгона, время движения с постоянной скоростью и время торможения, а также скорость движения. Заметим, что для шарниров типовые законы с максимально возможными скоростями и ускорениями представляют собой решение, близкое к оптимальному по быстродействию, а соответствующие траектории на картах столкновений в первом приближении являются кусочно-линейными. Это позволяет оператору легко прокладывать в n -мерном конфигурационном пространстве маршруты обхода препятствий (см. этап 2).

Очевидно, что в общем случае задача синтеза траекторий безопасного движения является многокритериальной. При расчетах в n -мерном конфигурационном пространстве в качестве критериев оптимизации могут быть выбраны:

быстродействие;

безопасность маневра (когда в конфигурационном пространстве обеспечивается максимальное удаление траектории от запретных зон);

износ шарниров (когда обеспечивается минимум суммарного приращения модулей перемещений в шарнирах);

вибрационная нагрузка механизмов (когда для $q_i^r(t)$, $i = \overline{1, n}$ требуется более высокий порядок интерполяционных полиномов).

Возможны и другие варианты критериев, а также комбинации перечисленных выше.

4. Тестирование программных законов. На этом этапе осуществляется анализ программного движения робота при найденных законах движения в шарнирах $q_i^r(t)$, $i = \overline{1, n}$. Кроме того, здесь в соответствии с уравнением динамики робота определяются требуемые силы и моменты в шарнирах, максимальные скорости и ускорения в различных точках конструкции робота, а также значения основного и дополнительных критериев. Для тестирования может использоваться универсальное программное обеспечение. При невыполнении установленных ограничений и требований осуществляется возврат ко второму этапу.

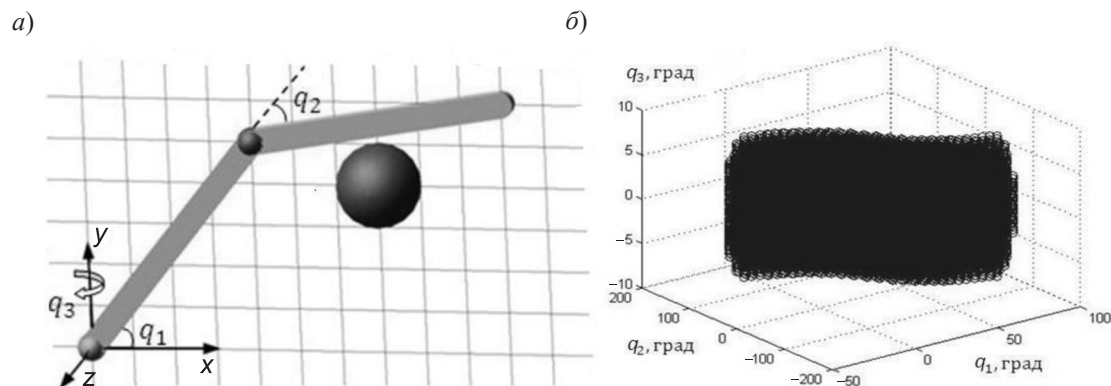


Рис. 1. 3D-сцена рабочего пространства робота (а) и поверхность столкновений в трехмерном конфигурационном пространстве (б)

Расчетный пример

Рассмотрим двухзвеновик с тремя степенями подвижности, трехмерная модель сцены рабочего пространства которого приведена на рис. 1 а. Звенья имеют цилиндрическую форму. Геометрические размеры звеньев: $l_1 = l_2 = 0,3$ м, $r = 0,01$ м. Заданы начальная и конечная конфигурации: $q_{10} = q_{20} = q_{30} = 0$, $q_{1T} = 60^\circ$, $q_{2T} = q_{3T} = 0$, а также препятствие в виде шара радиусом $R = 0,05$ м с координатами центра: $x_R = 0,35$ м, $y_R = 0,2$ м, $z_R = 0$.

Конструктивные ограничения имеют следующий вид: $-50^\circ \leq q_1 \leq 100^\circ$, $-200^\circ \leq q_2 \leq 200^\circ$, $-10^\circ \leq q_3 \leq 10^\circ$.

Кинематические ограничения для всех шарниров идентичны: $|\dot{q}| \leq 0,2$ рад/с, $|\ddot{q}| \leq 0,1$ рад/с².

На рис. 1 б приведена поверхность столкновений в трехмерном конфигурационном пространстве. На рис. 2 показана серия карт стол-

кновений в координатах (q_1, q_2) при изменении координаты q_3 . Совместный анализ карт столкновений и 3D-сцены рабочего пространства робота (см. рис. 1 а) показывает, что при принятых исходных данных существует множество решений, из которых надо выбрать лучшее в определенном смысле. Рассмотрим несколько вариантов движения:

- 1) без выхода двухзвеновика из вертикальной плоскости ($q_3 = 0$);
- 2) с выходом полностью вытянутого двухзвеновика ($q_2 = 0$) из вертикальной плоскости;
- 3) при ограниченном выходе двухзвеновика из вертикальной плоскости ($-7^\circ \leq q_3 \leq 7^\circ$).

Каждый из вариантов тоже имеет множество решений. Заметим, что при более жестких конструктивных ограничениях решения вообще могут отсутствовать, т. е. задача может стать некорректной. Например, при расположении на карте столкновений начальной и конечной конфигураций в

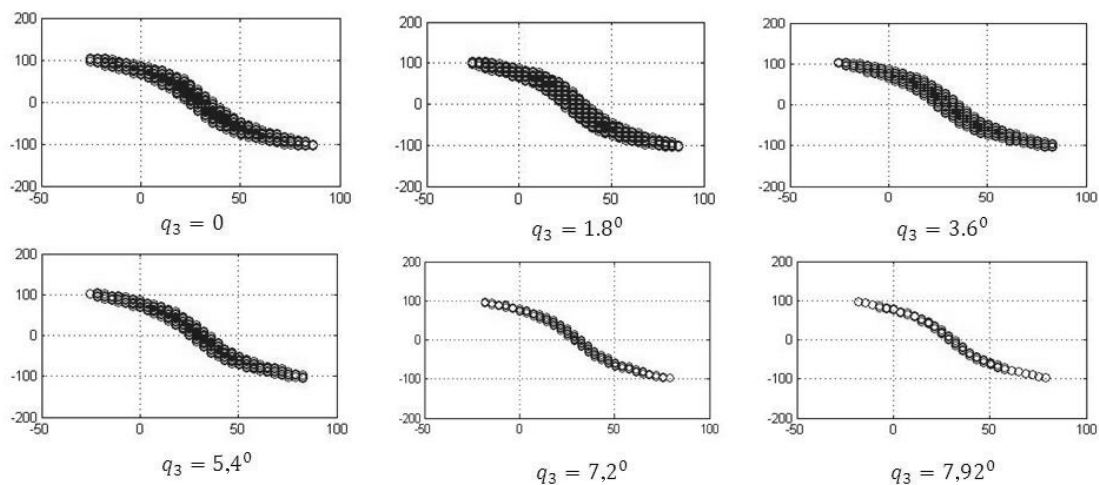


Рис. 2. Серия карт столкновений (q_1, q_2) при изменении координаты q_3

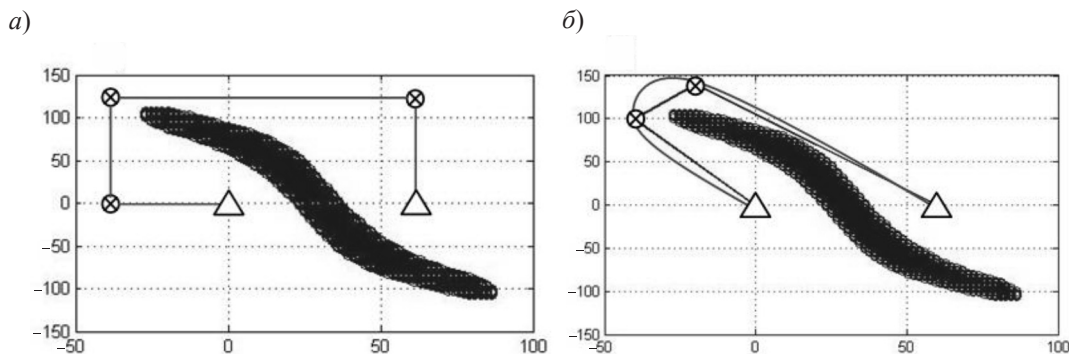


Рис. 3. Стратегии обхода препятствия на карте столкновений (q_1, q^2) при $q^3 = 0$:
 а – попеременное движение в шарнирах с тремя промежуточными конфигурациями;
 б – совместное движение с двумя промежуточными конфигурациями

разных частях многосвязной свободной зоны.

В а р и а н т 1. На рис. 3 приведены возможные стратегии обхода препятствия для варианта 1. В первом случае (рис. 3 а) оператор выбирает стратегию попеременного движения в шарнирах. При этом ему нужно указать как минимум три промежуточные конфигурации и выбрать траекторию так, чтобы не нарушить ограничение на показатель безопасности.

Очевидно, что при попеременном движении возможные траектории состоят из отрезков параллельных координатным осям. На рис. 3 а и далее начальная и конечная конфигурации обозначены треугольниками, а промежуточные конфигурации – кругами с крестиками.

Во втором случае (рис. 3 б) оператор выбирает стратегию совместного движения. Чтобы не нарушить ограничения на показатель безопасности оператору нужно определить не менее двух промежуточных конфигураций. При этом траекторию в первом приближении можно задать прямыми линиями. Прямолинейные траектории

соответствуют движению в шарнирах с постоянными скоростями. Реальная траектория в общем случае криволинейна из-за несовпадения во времени участков разгона и торможения.

При выбранной стратегии обхода препятствия оптимизацию траекторий можно осуществлять двумя способами:

- изменением промежуточных конфигураций;
- изменениями параметров типовых законов движения.

Минимизируя время движения из начальной конфигурации в конечную при ограничении на показатель безопасности для случая попеременного движения в шарнирах при принятых кинематических ограничениях, получим $T = 39,15$ с.

Результаты оптимизации программных законов движения робота для стратегии обхода препятствия с двумя промежуточными конфигурациями приведены на рис. 4. Общее время движения для этого случая составляет $T = 28,44$ с. Соответствующая траектория в конфигурационном пространстве имеет вид непрерывной кривой

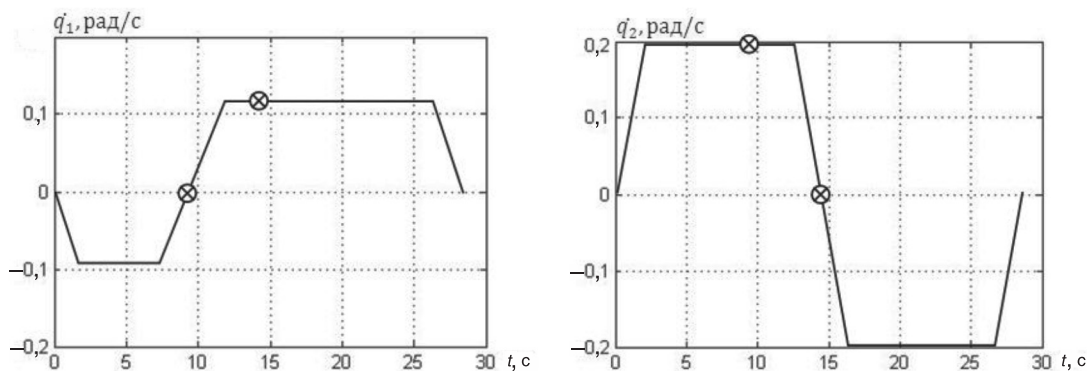


Рис. 4. Результаты оптимизации программных законов движения робота для стратегии обхода препятствия с двумя промежуточными конфигурациями

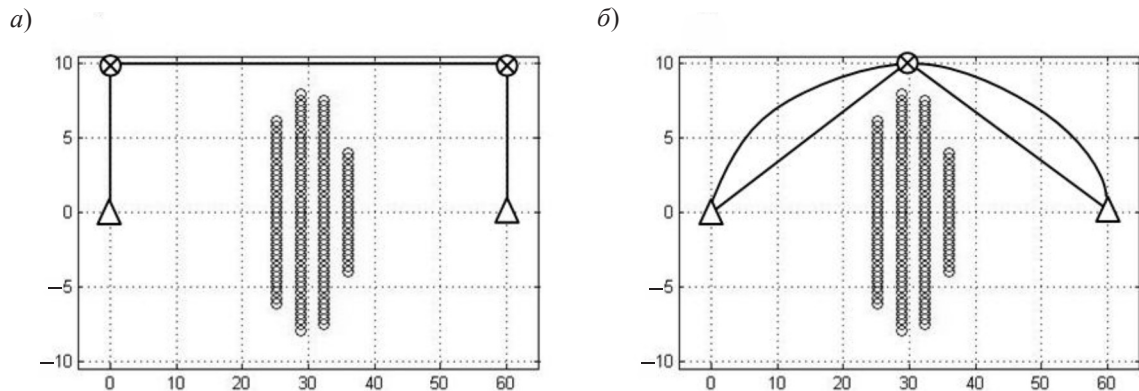


Рис. 5. Стратегии обхода препятствия на карте столкновений (q_1, q_2) при $q_3 = 0$:
а – попеременное движение в шарнирах с двумя промежуточными конфигурациями;
б – совместное движение с одной промежуточной конфигурацией

(см. рис. 3 б). Видно, что движение в обоих шарнирах начинается и заканчивается в одно и то же время, при этом промежуточные конфигурации отрабатываются шарнирами одновременно.

В а р и а н т 2. На рис. 5 приведены возможные стратегии обхода препятствия для второго варианта. В первом случае (рис. 5 а) оператор опять выбирает стратегию попеременного движения в шарнирах. При этом ему нужно определить как минимум две промежуточные конфигурации. Оптимизация по времени при ограничении на показатель безопасности в этом случае дает $T = 12,52$ с.

Во втором случае (рис. 5 б) оператор выбирает стратегию совместного движения с одной промежуточной конфигурацией. Результаты оптимизации программных законов движения робота в этом случае представлены на рис. 6. Общее время движения из начальной конфигурации в конечную составляет $T = 7,24$ с.

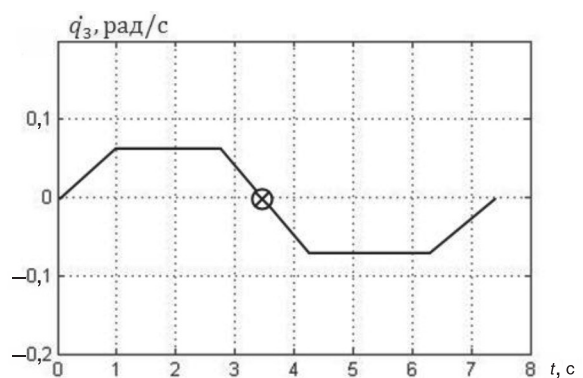
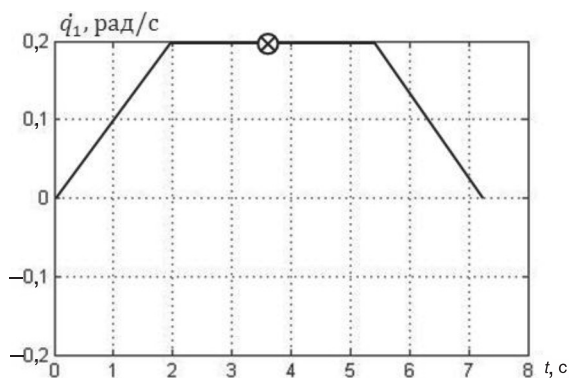


Рис. 6. Результаты оптимизации программных законов движения робота для стратегии обхода препятствия с одной промежуточной конфигурацией

В а р и а н т 3. В случае когда возможен лишь ограниченный выход двухзвенника из вертикальной плоскости вариант 2 становится нереализуемым. Вместе с тем даже при ограниченном выходе двухзвенника из вертикальной плоскости в случае совместного движения по трем координатам q_1, q_2, q_3 можно уменьшить время движения по сравнению с вариантом 1 (см. рис. 4) до значения $T = 26,65$ с.

Расчеты подтвердили эффективность предложенного подхода. Использование карт столкновений вместе с 3D-сценой рабочего пространства робота оказалось удобным по ряду причин:

- возможность расчета и оптимизации траектории по разным критериям с учетом имеющихся ограничений;
- наглядная визуализация возможных столкновений;
- оперативная корректировка целеуказания при появлении новых препятствий;



универсальность алгоритмического и программного обеспечения;

максимальное использование опыта оператора при планировании траекторий.

Универсальность алгоритмического и программного обеспечения обусловлена тем, что все расчеты проводятся для контуров препятствия и элементов конструкции робота, представляющих собой совокупности типовых геометрических объектов. Это позволяет расширить класс решаемых задач, включив в него некоторые задачи с подвижными препятствиями. В частности, при движении препятствия в ограниченной области в трехмерной сцене рабочего пространства робота можно сформировать последовательность контуров препятствия в разные моменты времени. По этой последовательности строятся карты столкновений и соответствующая им мажоранта запретных зон. В оставшихся свободных зонах задача решается так же, как для неподвижных препятствий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Robotic Visious to 2020 and beyond [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.robotics-platform.eu>; <http://www.robotics-care.eu>

2. **Арнольд, В.Л.** Математические методы классической механики [Текст] / В.Л. Арнольд. – М.: Наука, 1989. – 472с.

3. **Форсайт, Девид А.** Компьютерное зрение. Современный подход [Текст] / Девид А. Форсайт, Жан Понс; Пер. с англ. – М.: ИД «Вильямс», 2004. – 928 с.

4. **Shin, K.G.** Minimum-time control of robotics manipulators with geometric pack constraints [Text] /

K.G. Shin, N.D. McKay // IEEE of Automatic Control. AC-30. – 1985. – № 6. – Р. 531–541.

5. **Корендяев, А.И.** Теоретические основы робототехники [Текст] / А.И. Корендяев, Б.А. Саламандра, Л.И. Тывес. – М.: Наука, 2006. – 759 с.

6. **Михайлюк, М.И.** Использование трехмерной визуализации в тренажерных системах управления роботами и манипуляторами [Текст] / М.И. Михайлюк, М.А. Торгашев, И.А. Хураськин // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2006. – № 1-3. – Т. 4. – С. 156–163.

УДК 004.932./004.056.55

В.Н. Шашихин, Н.В. Богач, В.А. Чупров

АНАЛИЗ КРИПТОСТОЙКОСТИ АЛГОРИТМОВ ШИФРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ХАОТИЧЕСКОГО ОТОБРАЖЕНИЯ ТИПА tent

Проблема анализа криптостойкости и получения количественных характеристик алгоритмов шифрования, основанных на хаотических отображениях, актуальна в связи с необходимостью позиционирования криптографических систем, основанных на хаотических отображениях, в числе прочих современных криптосистем. Криптографические системы, основанные на хаотических отображениях, образуют одну из двух основных групп криптосистем, использующих хаос [6].

Применяемое для криптографического преобразования хаотическое отображение имеет большое влияние на такие характеристики алгоритма, как скорость работы, соотношение объемов открытого и зашифрованного текстов, устойчи-

вость к атакам на основе известного/выбранного открытого текста/шифртекста и метода прямого перебора. Для ряда хаотических криптосистем подобные исследования уже проводились.

В [7] реализована криптосистема, в которой отображение, обратное к одномерному отображению tent-map, N раз применяется к начальным условиям, представляющим собой простой текст. На каждой итерации случайным образом выбирается один из двух возможных прообразов. Расшифровка происходит путем итерирования tent-отображения N раз. Для N обратных итераций возможно $2N$ различных вариантов зашифрованного текста.

В [8] показано, что такую криптосистему лег-

ко взломать, используя схему атаки с выбранным зашифрованным текстом, и что сложность атаки с известным текстом равна 238.

В статье [9] описан метод, в котором одноразовая последовательность генерируется при помощи двумерных $N \times M$ блоков с помощью геометрической процедуры, зависимой от ключа, которая напоминает обобщенное двумерное отображение пекаря (Baker map). Ключ используется для того, чтобы сгенерировать начальный блок битов, который затем подвергается многократным перестановкам и операциям XOR с самим собой. После $\log_2(N + M)$ итераций получается блок псевдослучайного вида. Этот блок затем XOR-складывается с простым текстом. Данная процедура линейна по отношению к простому тексту, и ее криптографический анализ требует инвертирования матрицы порядка $N \times M$. Автор утверждает, что т. к. сложность обращения матрицы растет как третий порядок ранга матрицы $N \times M$, при достаточно большом блоке метод становится безопасным.

Одним из немногочисленных примеров использования систем с непрерывным временем является работа [10], авторы которой используют хаотические цепи для построения генератора псевдослучайных чисел. Полученный хаотический сигнал дискретизируется по амплитуде и времени. Большинство описанных в литературе приложений хаоса для криптографии предназначены для генерации гаммы при потоковом шифровании. Однако возможны и схемы блочного шифрования [11].

В данной статье проводится анализ модифицированного алгоритма шифрования на основе tent-отображения, предложенного в [1].

Оценка основных параметров алгоритма

В [3] сформулированы критерии, которым должен удовлетворять криптографический алгоритм

1. При отображении исходного сообщения в зашифрованное, в последнем не должно присутствовать никаких структур.

2. Схема шифрования должна быть чувствительной относительно открытого текста и относительно ключа. Это означает, что изменение одного бита в исходном сообщении или в ключе приводит к созданию абсолютно нового зашифрованного сообщения.

3. Схема шифрования должна быть симметричной относительно времени шифрования/рас-

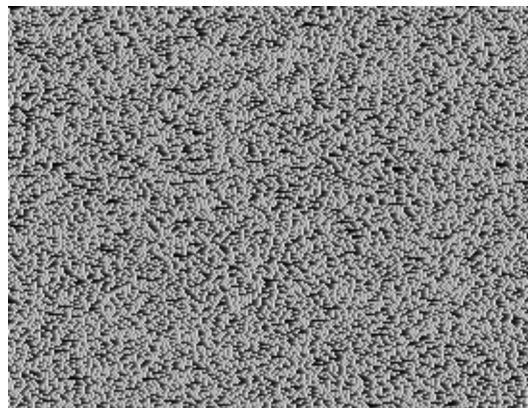


Рис. 1. Зашифрованное изображение черного квадрата

шифрования. Это означает, что шифрование и расшифрование занимают одинаковое время.

4. Объем зашифрованного сообщения не должен превышать объем исходного сообщения.

5. Простота и скорость алгоритма шифрования.

6. Возможность адаптации схемы шифрования к различным видам информационных сигналов.

7. Возможность изменения длины ключа.

Рассмотрим каждый критерий применительно к описанному алгоритму шифрования на основе схемы с нелинейным подмешиванием.

Уже при использовании схемы шифрования с однократным повторением спектр яркости цветов пикселей кодированного изображения становится равномерным. Проверим, как изменится спектр кодированного изображения, если исходное изображение будет иметь большее количество точек

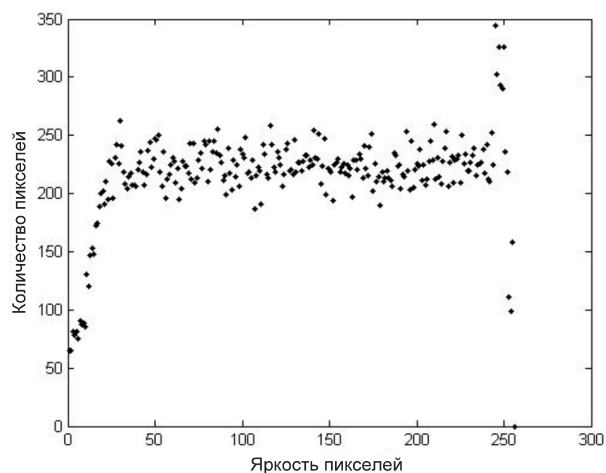


Рис. 2. Спектр яркости цветов пикселей изображения 2



одного цвета. Выберем в качестве такого изображения черный квадрат. После применения к нему схемы шифрования с однократным повторением хаотического tent-отображения $\{x : \mathcal{R}_1 \rightarrow \mathcal{R}_1\}$:

$$x_{n+1} = \begin{cases} \frac{x_n}{\mu}, & x_n < \mu \\ \frac{1-x_n}{1-\mu}, & x_n > \mu \end{cases}, \quad (1)$$

где $0 < \mu < 1$ – параметр симметрии. Результирующее изображение и его спектр показаны на рис. 1, 2. Спектр черного квадрата после шифрования становится равномерным, а само изображение неузнаваемым.

Таким образом, исследуемая схема удовлетворяет условию отсутствия структур в шифртексте. Следует также отметить, что помимо выполнения данного условия необходимо, чтобы сама генерируемая гамма выглядела случайным образом. Поскольку в качестве функции шифрования в схеме используется tent-отображение, которое является хаотическим во всем диапазоне параметра μ , то производимая ею последовательность является псевдослучайной [3].

Численные эксперименты, проведенные для схемы с одним повторением, показывают, что при малом изменении цвета одного (первого) пиксела корреляция между двумя вариантами шифртекста составила менее 1 %. Аналогичная ситуация наблюдается при малых возмущениях в ключе (параметре μ). Таким образом, схема демонстрирует наличие хороших диффузионных свойств.

Поскольку схема декодера аналогична по своей структуре и элементному содержанию схеме кодера, то время, затрачиваемое на кодирование открытого текста, совпадает со временем дешифрования шифртекста. Это означает, что представленная схема шифрования симметрична относительно времени шифрования/дешифрования.

Важной характеристикой схем шифрования является изменение объема открытого текста в процессе шифрования. Поскольку в рассматриваемой схеме кодирования каждый символ открытого текста заменяется одним символом шифртекста из того же алфавита, то объем закодированного сообщения равен объему исходного сообщения. Таким образом, схема шифрования симметрична относительно объемов открытого и зашифрованного текстов. За счет малого количества логических операций, а также за счет того, что она принадлежит к классу поточных шифров,

скорость шифрования алгоритма максимально высока.

Выбор изображений в качестве открытого текста продиктован высокой сложностью шифрования данного вида информации. Графическая информация наиболее подвержена выявлению в ней различных структур и, следовательно, уязвима к криптоанализу. Предложенная схема может быть легко адаптирована к любому виду информации. При этом необходимо выполнить перенормировку диапазона определения отображения под алфавит открытого текста [1].

В схеме кодирования с повторениями длина ключа определяется количеством применений функции шифрования [1]. Следовательно, задавая число повторений можно легко изменять длину ключа.

Таким образом, схема шифрования удовлетворяет всем основным критериям, предъявляемым к криптографическим системам.

Проверка устойчивости алгоритма к криптоатакам

Перейдем теперь непосредственно к криптоанализу системы с повторениями и исследуем ее устойчивость к двум основным видам атак, характерным для данного вида систем: атаке методом грубой силы (т. е. методом последовательного перебора всех ключей) и атаке на основе известного открытого текста.

При атаке методом грубой силы криптостойкость системы определяется числом независимых ключей шифрования. Введение в схему одношагового шифрования блока повторного применения функции шифрования позволяет в пределе увеличивать число ключей вдвое за одно повторное применение. Ограничения на число возможных ключей налагаются, во-первых, при асимметрии tent-отображения и, во-вторых, количеством бит (52 бита), отводимых в процессоре под действительные числа, т. к. ключ шифрования определяется только значением параметра μ отображения (1). Следовательно, количество ключей в рассматриваемой схеме не может превышать 2^{52} .

Для избежания снижения скорости роста рекомендуется сузить диапазон значений параметра μ , например, ограничив его значениями 0,4 и 0,6. Такое сужение, с одной стороны, не скажется на общем количестве возможных ключей, а, с другой, – скорость их роста будет приблизительно

удваиваться за одно повторное применение функции шифрования.

Для снятия ограничения, связанного с точностью представления действительного числа, можно в нелинейном преобразователе при повторных применениях функции шифрования в качестве последних использовать tent-отображение с разными значениями параметра μ . При этом число ключей будет равно $v = 2^{l*k}$, где l – точность представления параметра μ ; k – количество функций шифрования с разными значениями параметра μ . Если используется ограниченный диапазон $(0,4 \div 0,6)$ значений параметра μ , то l приблизительно равно 50. Тогда число ключей $v = 250*k$ и уже при использовании в функции шифрования двух разных параметров длина ключа может достигать до 100 бит ($v = 2^{100}$).

Другим вариантом решения данной проблемы является введение в tent-отображение дополнительных кусочно-линейных сегментов. Введение дополнительных сегментов означает увеличение количества параметров системы. Число ключей в этом случае определяется как $v = 2^{l*m}$, где l – точность представления параметров; m – количество параметров в кусочно-линейном отображении. Таким образом, в предлагаемой схеме шифрования путем несложных дополнений можно получить ключ шифрования наперед заданной длины. Это означает устойчивость схемы шифрования к атаке методом грубой силы.

Исследуем теперь схему с повторениями в режиме атаки на основе известного открытого текста. Этот режим позволяет криптоаналитику как пользоваться для дешифрования шифртекста самим шифртекстом, так и иметь доступ к исходному открытому тексту. Это означает, что в нашем распоряжении имеется информационный сигнал:

$$S1, S2, S3 \quad (2)$$

и его зашифрованная версия

$$\begin{aligned} S1 + x1, S2 + f^N(S1 + x1); \\ S3 + f^N(S2 + f^N(S1 + x1))... \end{aligned} \quad (3)$$

где N – количество повторных применений функции шифрования.

Вычтем почленно из последовательности (3) последовательность (2):

$$x1, f^N(S1 + x1); f^N(S2 + f^N(S1 + x1))... \quad (4)$$

Последовательность (4) представляет собой отсчеты сигнала хаотической системы нелиней-

ного преобразователя. Используя (3) и (4), можно построить на фазовой плоскости зависимость текущего отсчета от предыдущего:

$$\begin{aligned} [S1 + x1, f^N(S1 + x1)], [S2 + f^N(S1 + x1), \\ f^N(S2 + f^N(S1 + x1))]... \end{aligned} \quad (5)$$

Точки зависимости (5) принадлежат отображению хаотической системы нелинейного преобразователя. Поэтому, выбирая последовательность (2) достаточно длинной, по построенному графику можно определить вид самого отображения. Очевидно, что атака на основе известного открытого текста приводит к восстановлению вида хаотического отображения нелинейного преобразователя и, следовательно, к вычислению ключа шифрования.

Выясним причину, позволяющую вскрывать схему шифрования. Рассмотрим еще раз последовательность (3). В ней информационный сигнал (2) напрямую подмешивается к отсчетам нелинейного преобразования. Поэтому, имея в своем распоряжении последовательности (2) и (3), всегда (вне зависимости от применяемого отображения) можно получить последовательность (4) и построить последовательность (5), которая позволит получить вид нелинейного преобразования. Необходимо ввести дополнительную операцию, которая позволит избежать прямого сложения информационного и хаотического сигналов. Теперь для получения последовательности (4) криптоаналитику необходимо знать параметры преобразования $g(...)$. В качестве последнего может быть введен дополнительный раунд нелинейного подмешивания. Последовательность примет следующий вид:

$$\begin{aligned} S1 + x1(1) + x1(2); \\ S2 + f^{N1}(S1 + x1(1)) + f^{N2}(S1 + x1(1) + x1(2)). \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом, введение в рассматриваемую схему шифрования дополнительного цикла с нелинейным подмешиванием позволяет противостоять атаке на основе известного открытого текста. В качестве $g(...)$ могут также использоваться другие виды хаотических отображений, можно рекомендовать пред- и постобработку изображений путем применения к ним прочих одномерных и двумерных хаотических отображений [3].

В статье проведена проверка модифицированного алгоритма шифрования на соответствие критериям, сформулированным в [3]. Исследова-



на производительность схемы шифрования и ее устойчивость к основным видам криптографических атак. Подход к анализу криптостойкости ал-

горитма шифрования, которого придерживаются авторы, применим для анализа криптостойкости всех алгоритмов данного класса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Богач, Н.В.** Проблема малого количества ключей в алгоритме шифрования двумерных данных на основе tent-отображения [Текст] / Н.В. Богач, В.А. Чупров, В.Н. Шашихин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. –2012. –№ 2.
2. **Кузнецов, С.П.** Динамический хаос [Текст] / С.П. Кузнецов. –М.: Физматлит, 2006. –356 с.
3. **Алферов, А.П.** Основы криптографии: Учеб. пособие [Текст] / А.П. Алферов, А.Ю. Зубов, А.С. Кузьмин [и др.]. –М.: Гелиос АРВ, 2002. –480 с.
4. **Птицын, Н.** Приложение теории детерминированного хаоса в криптографии [Текст] / Н. Птицын. –Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002. –80 с.
5. **Андреев, Ю.В.** Использование динамического хаоса в коммуникационных системах и компьютерных сетях [Текст] / Ю.В. Андреев, А.М. Балабин, А.А. Дмитриев [и др.]. –М.: Препринт ИРЭ РАН, 2000. –№ 2 (626). –76 с.
6. **Alvarez, G.** Some basic cryptographic requirements for chaos-based cryptosystems [Text] / G. Alvarez, S. Li // International J. of Bifurcation and Chaos. –2006. –Vol. 16 (8). –P. 2129–2151.
7. **Habutsu, T.** A Secret Key Cryptosystem by Iterating a Chaotic Map [Text] / T. Habutsu, Y. Nishio, I. Sasase [et al.] // Advances in Cryptology. EUROCRYPT'91; ed. D.W. Davies. –LNCS 547. –Berlin: Springer-Verlag, 1991. –127 p.
8. **Biham, E.** Cryptanalysis of the Chaotic-Map Cryptosystem Suggested at EUROCRYPT'91 [Text] / E. Biham // Advances in Cryptology. EUROCRYPT'91; ed. D.W. Davies. –LNCS 547. –Berlin: Springer-Verlag, 1991. –532 p.
9. **Deffeyes, K.S.** Encryption System and Method [Text] / K.S. Deffeyes. –US Patent № 5,001,754. –Mar. 19. 1991.
10. **Bernstein, G.M.** Method and Apparatus for Generating Secure Random Numbers Using Chaos [Text] / G.M. Bernstein, M.A. Lieberman. –US Patent № 5,007,087. –Apr. 9. 1991.
11. **Fridrich, J.** Symmetric Ciphers Based on Two-dimensional Chaotic Maps [Text] / J. Fridrich // Int. J. Bifurcation and Chaos. –1998. –Vol. 8. –№ 6. –1259 p.
12. **Дмитриев, А.С.** Динамический хаос: новые носители информации для систем связи [Текст] / А.С. Дмитриев, А.И. Панас. –М.: Физматлит, 2002. –252 с.

УДК 007:681.512.2

Л.Ю. Григорьев, А.А. Заблоцкий, Д.В. Кудрявцев

ТЕХНОЛОГИЯ НАПОЛНЕНИЯ БАЗ ЗНАНИЙ ОНТОЛОГИЧЕСКОГО ТИПА

В качестве основы баз знаний в настоящее время выступают онтологии [1–3]. Для представления онтологий в базах знаний используются специальные языки: RDFS [4], OWL [5]. Указанные языки эффективны для решения задач автоматизированной интеграции информации, обмена знаниями и выполнения логического вывода. Проблема существующих языков и методов онтологического инжиниринга заключается в том, что основной акцент в них сделан на задаче проектирования онтологии, а важность формата представления знаний для наполнения онтологии экземплярами недооценивается и отдается на откуп разработчикам редакторов онтологий и баз знаний. В результате этого при разработке масштабных баз

знаний (более 1000 элементов) в существующих инструментах возникают сложности при наполнении онтологий: экспертам в предметной области, не являющимся специалистами в семантических технологиях, сложно вводить информацию в базу знаний, а также сопровождать ее.

В статье предлагается язык классификаторов и проекций для формирования баз знаний онтологического типа, в котором в явном виде задается формат для визуальной работы с экземплярами онтологии, их атрибутами и отношениями.

Обзор методов и программных средств для ручного наполнения онтологий

Для ручного наполнения онтологии могут

использоваться RDF-редакторы, универсальные и специализированные редакторы онтологий, предметно-ориентированный подход к моделированию (DSM), а также семантические вики.

RDF-редакторы. Инструменты, называемые «RDF-редакторами», имеют довольно разнообразную функциональность. Некоторые просто предоставляют пользователям экранные формы для создания RDF-файла – они освобождают пользователя от необходимости вводить синтаксические конструкции и предоставляют несложные возможности автозаполнения (например, [6]). Некоторые инструменты (например, [7]) представляют визуальный интерфейс, позволяющий пользователю увидеть в развернутом виде соответствующий RDF-граф. Система Tabulator [8] является уникальной в данном классе тем, что работает в распределенном режиме. Вместо создания одного локального RDF-файла, Tabulator позволяет пользователям видеть и редактировать распределенную семантическую паутину прямо на рабочем месте. RDF-утверждения, полученные из нескольких источников, представляются пользователю так, как будто они составляют единый согласованный граф. Редактирование такого графа приводит к тому, что Tabulator вносит изменения в более чем одно RDF-хранилище.

Универсальные редакторы онтологий. Приложения, такие, как Protege (<http://protege.stanford.edu/>) and NeOn (<http://neon-toolkit.org/>) также позволяют пользователям совместно создавать знания, однако акцент в данных средствах сделан на разработке схемы, а не на вводе фактов/данных: онтология вместо ее экземпляров. Они предоставляют понятный инструментальный для установления сложных взаимосвязей и ограничений между классами. Недостатком универсальных редакторов в контексте задачи ввода экземпляров онтологии является их сложность для неспециалистов в области семантического веба (экспертов в предметной области). Кроме того, сам механизм ввода экземпляров онтологии, основанный на использовании форм, не всегда эффективен.

Предметно-ориентированный подход к моделированию (Domain-Specific Modeling, DSM). При визуализации и наполнении онтологий можно использовать DSM-подход, широко распространенный при разработке средств программирования [9]. Подход подразумевает быстрое создание визуального языка и соответствующего графического редактора. Обзор сред быстрой раз-

работки графических редакторов можно найти здесь [10, 11]. Достоинство этого подхода в том, что можно создать свой собственный визуальный язык, понятный и удобный для неспециалистов в области семантических технологий. Ограничением данного подхода можно считать сложность работы с масштабными моделями.

Специализированные редакторы. Специализированные приложения для наполнения онтологий обеспечивают максимальные возможности по адаптации инструмента под заданную онтологию и требования пользователя. Основное преимущество использования специализированных редакторов – корректность вводимых данных, поскольку разработчики данных систем могут предоставить конечным пользователям интуитивно понятный минимальный необходимый и достаточный функционал для решения требуемых задач, снижающий вероятность ошибок ввода данных.

Недостатком данного подхода являются затраты, связанные с разработкой и сопровождением соответствующих специализированных приложений. Также данный подход накладывает временные ограничения (разработка редактора не может начаться, пока не будет готова онтология) и предполагает необходимость обновления системы в случае изменения онтологии.

Семантические вики. Семантические вики объединяют свойства вики-систем с семантическими утверждениями. В процессе редактирования веб-страницы пользователь может добавить семантическое описание содержимого с помощью RDF-совместимых утверждений. Это может быть реализовано либо через расширение разметки [12], либо через отдельный интерфейсный механизм [13]. Использование семантических вики основано на предпосылке о том, что пользователь, в основном, работает с естественным языком и хочет дополнить неструктурированный текст семантическими данными.

Большинство из этих подходов предоставляют визуальный пользовательский интерфейс для ввода и редактирования экземпляров классов и их свойств. Однако до сих пор мало внимания уделяется удобству предлагаемого интерфейса. Наиболее распространенный подход – использование форм для ввода данных – не всегда удобен: за множеством форм, позволяющих представить свойства отдельной моделируемой сущности, сложно видеть целостную систему связей в онтологической модели (базе знаний). Хотя существу-



Схема соответствия элементов языка классификаторов и проекций компонентам языка OWL

Элементы предложенного языка	Элементы OWL
TYPES	
$e\text{-type}_i + \text{sign}$	owl:Class + rdfs:label(пиктограмма)
$pt\text{-type}_k + \text{sign}$	owl:DatatypeProperty + rdfs:label(пиктограмма)
$rel\text{-type}_j + \text{sign}$	owl:ObjectProperty + rdfs:label(пиктограмма)
(«является», $e\text{-type}_{i1}$, $e\text{-type}_{i2}$)	rdfs:subClassOf (owl:Class, owl:Class) rdfs:subPropertyOf
CL	
Onto-CL	
$type_{cli}$	owl:Class ИЛИ owl:DatatypeProperty ИЛИ owl:ObjectProperty
$\{(type_{cli}, pt\text{-type}_k, pt\text{-type}_{k}^{VAL})\}$	owl:DatatypeProperty (rdfs:domain, rdfs:range)
$\{(rel\text{-type}_j, type_{cli1}, type_{cli2})\}$	owl:ObjectProperty (rdfs:domain, rdfs:range) граф, создаваемый на основе указанной связи должен быть деревом
Base-CL	
$\{E_{ci}\}$ – элементы классификатора	rdf:ID (Индивиды) ИЛИ owl:DatatypeProperty ИЛИ owl:ObjectProperty
(«имеет тип», E_{ci1} , $e\text{-type}_i$)	rdf:type(E_i , C_{oi})
($rel\text{-type}_j$, E_{ci1} , E_{ci2})	owl:ObjectProperty (E_1 , E_2) получаемый граф, должен быть деревом
PR	
Onto-PR	
($rel\text{-type}_j$, $type_{cli1}$, $type_{cli2}$)	owl:ObjectProperty (rdfs:domain, rdfs:range) Иногда: owl:DatatypeProperty (rdfs:domain, rdfs:range)
Base-PR	
($rel\text{-type}_j$, E_{ci1} , E_{ci2})	owl:ObjectProperty (E_1 , E_2) Иногда: owl:DatatypeProperty (E_1 , E_2)

ют некоторые решения, частично устраняющие данную проблему (например, InstanceTree плагин¹ для Protégé обеспечивает древовидную навигацию по фреймам, на которые прямо или опосредованно ссылается определенный экземпляр класса), они требуют более развитых средств для работы с неиерархическими связями.

Описание языка классификаторов и проекций для наполнения баз знаний онтологического типа

Язык классификаторов и проекций предназначен, в первую очередь, для наполнения онтологической базы знаний [14]. Он интегрирует иерархические списки с табличными представлениями (связи между несколькими иерархически-

ми списками) и визуальными (DSM) методами (экземпляры разных классов онтологии имеют уникальные пиктограммы).

Язык классификаторов и проекций содержит следующие элементы:

L :: = <TYPES, CL, PR, TASKS, SPEC >, где

TYPES – описание типов, позволяющее представить таксономию верхнеуровневых классов, типы связей между классами, значения свойств классов. Каждому типу ставится в соответствие пиктограмма (графический знак);

CL – классификатор, формат ввода нижнеуровневых классов и экземпляров онтологии, их свойств и иерархических связей между ними (основные типы связей: «класс-подкласс», «часть-целое», «подчиняется»; $CL = \{CL_i^{name}, \text{Onto-}CL_i, \text{Base-}CL_i\}$ – классификатор, где CL_i^{name} – имя классификатора; $\text{Onto-}CL_i$ – свойства класси-

¹ <http://protegewiki.stanford.edu/wiki/InstanceTree>

фикатора – часть классификатора, задающая состав типов элементов (в т. ч. визуально), перечисляемых в классификаторе, перечень их свойств с областями допустимых значений и типы иерархических связей между элементами; $Base-CL_i$ – содержание классификатора – часть классификатора, в которой перечисляются и типизируются моделируемые нижеуровневые классы, значения их свойств и задается древовидная система связей между классами);

PR – проекция, формат ввода связей между экземплярами онтологии, перечисленными в классификаторах (примеры типов связей: «выполняет», «обеспечивает достижение», «отвечает за»; $PR_j = \{PR_{jname}, Onto-PR_j, Base-PR_j\}$ – проекция, где PR_{jname} – наименование проекции; $Onto-PR_j$ – свойства проекции – часть проекции, определяющая состав связей между типами, перечисляемых в классификаторе элементов; $Base-PR_j$ – содержание проекции – часть проекции, содержащая множество связей между элементами, связываемых классификаторов);

TASKS – формат спецификации задач по разработке и использованию онтологии (не рассматривается в данной статье);

SPEC – формат спецификации запросов к онтологической модели (не рассматривается в настоящей статье).

Данный язык используется для структурирования и представления знаний, а также для формирования запросов к онтологической модели.

В таблице представлена схема соответствия элементов языка классификаторов и проекций компонентам языка OWL.

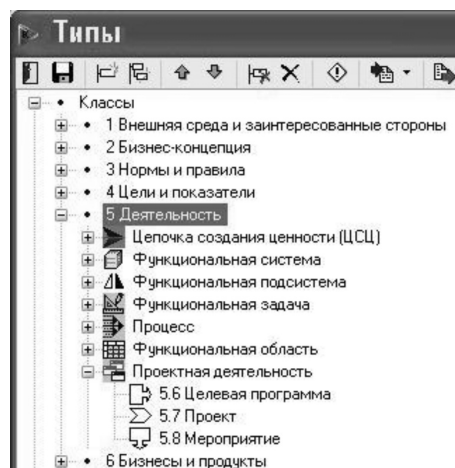


Рис. 1. Типы (TYPES) для разработки и визуализации верхнеуровневых классов

Программная реализация языка классификаторов и проекций в системе ОРГ-Мастер

Язык визуального проектирования и наполнения баз знаний реализован в системе ОРГ-Мастер [15]. На рис. 1 представлен фрагмент описания типов моделируемых в системе объектов.

Источником типов может быть готовая онтология, созданная в каком-либо стандартном редакторе онтологий.

При создании нижеуровневой онтологии (левое окно на рис. 2) происходит типизация элементов с помощью верхнеуровневой онтологии (правое окно). С точки зрения механизма визуализации, устанавливается связь между элементами двух иерархических списков.

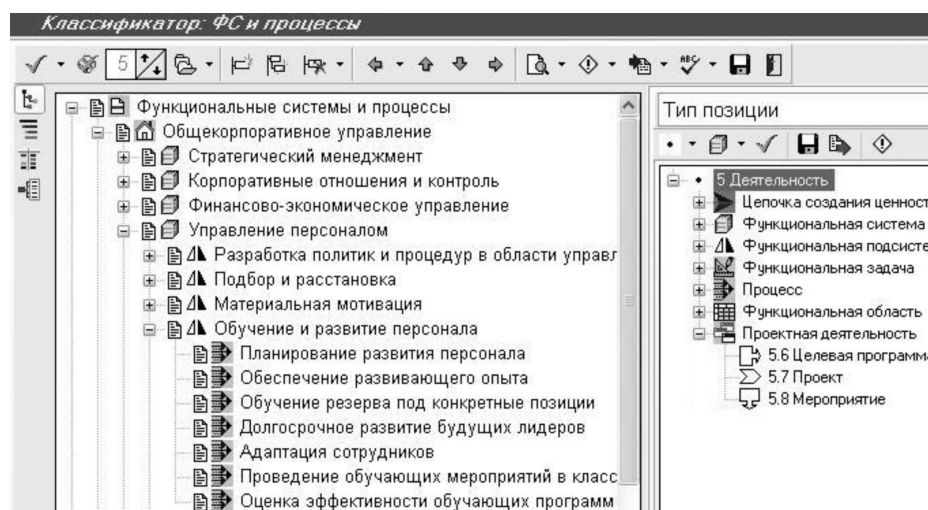


Рис. 2. Пример классификатора (CL) бизнес-процессов предприятия

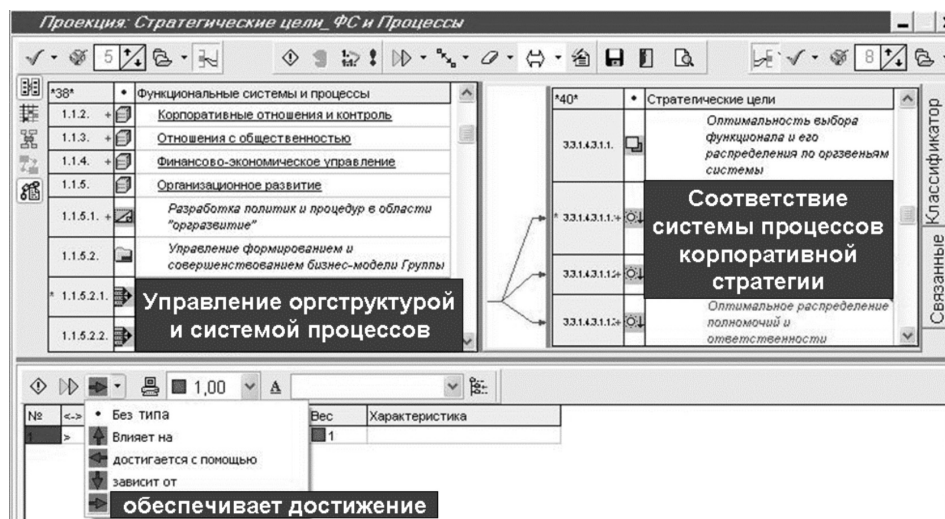


Рис. 3. Пример проекции (PR), связывающей бизнес-процессы предприятия с целями

Для визуализации перекрестных связей между классами используются проекции (рис. 3).

Связи в проекции могут быть направленными и ненаправленными, типизированными и нетипизированными.

Предлагаемый язык для наполнения онтологий и его программная реализация основаны на использовании графически размеченных иерархических списков [16] и связей между ними. Иерархические списки используются в первую очередь для ввода и редактирования экземпляров онтологии, хотя в частном случае они могут использоваться и для ввода классов (если тип связи в классификаторе «класс-подкласс»). Основные преимущества визуализации иерархическим списком – простота реализации и привычность для пользователя, поскольку такой же подход используется в многочисленных файловых браузерах (Проводник Microsoft Windows, Total Commander...). Данный метод дает четкое представление имен объектов и их иерархии. В отличие от других методов визуализации, в иерархическом списке имена классов не перекрывают друг друга, и чтобы их увидеть не нужно наводить курсор на соответствующий объект. Основная проблема визуализации иерархическим списком – представление только древовидных структур, но не сетевых. Однако данная проблема устранена в предложенном языке и программном инструментарии с помощью специального конструкта – проекции. Таким образом, предлагаемый способ визуализации онтологии позволяет устранить главный недостаток использования иерархических списков, сохранив его преимущества.

По простоте и наглядности разработанный инструмент близок средствам когнитивного моделирования (mindmappers, concept mappers), а по объему явно представленной семантики приближается к редакторам онтологий.

Настройка интерфейса пользователя-разработчика базы знаний

Для настройки интерфейсных форм языка классификаторов и проекций с помощью языка OWL и стандартных редакторов онтологий предлагается использовать элемент owl:AnnotationProperty, позволяющий производить аннотирование классов и свойств онтологии [17]. В аннотации предлагается указывать, в каком классификаторе или проекции будут редактироваться экземпляры аннотируемого класса или свойства.

Для реализации данного подхода онтология предметной области дополняется онтологической моделью интерфейса пользователя, содержащей следующее:

- классы «Классификаторы» и «Проекция»;
- экземпляры классов «Классификаторы» и «Проекция» – наименования конкретных классификаторов и проекций для наполнения онтологии;
- свойства-аннотации (owl:AnnotationProperty) «редактируется в классификаторе» и «редактируется в проекции».

После этого все классы и свойства онтологии предметной области, которую нужно наполнять, аннотируются с помощью заданных свойств-аннотаций и перечня классификаторов и проекций (рис. 4, 5).

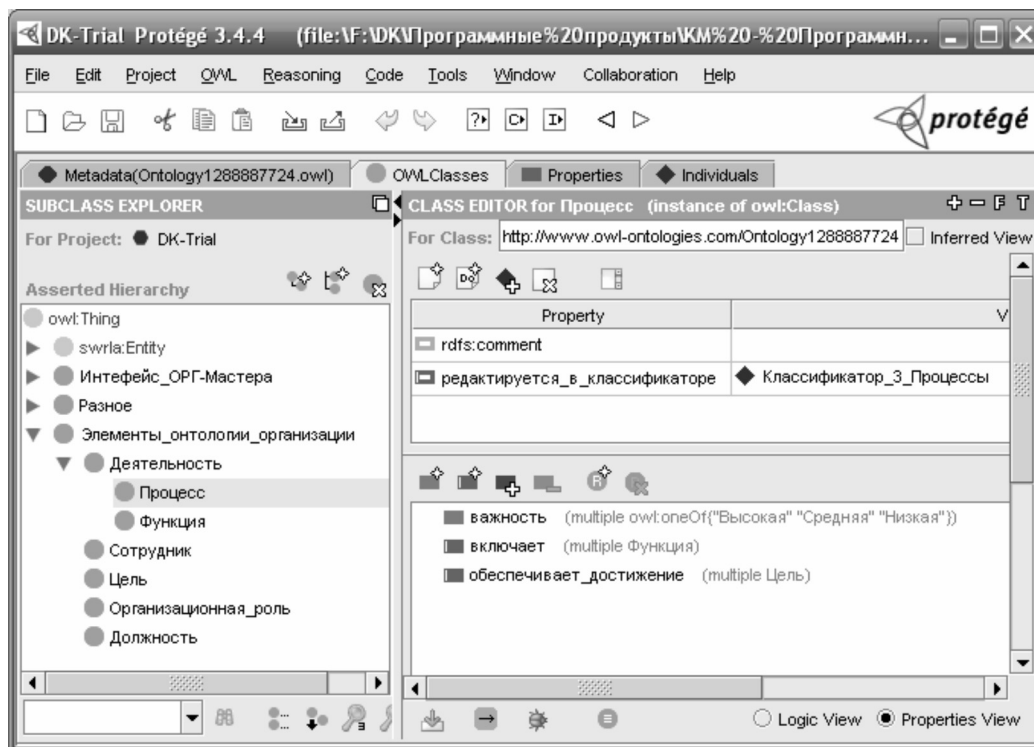


Рис. 4. Настройка классификатора: элементы класса Процессы редактируются в Классификаторе «Процессы»

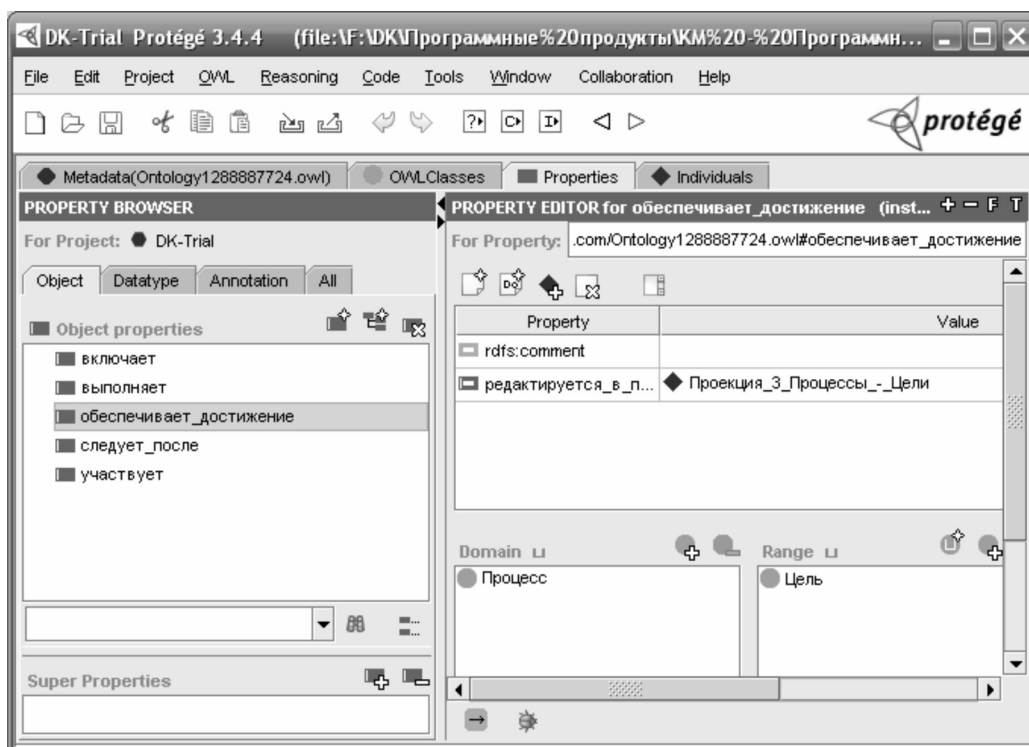


Рис. 5. Настройка проекции: свойства, связывающие Процессы с Целями, редактируются в проекции «Процессы – Цели»

Фрагмент полученной онтологии в формате OWL:

```
<owl:Class rdf:ID="Процесс">
  <редактируется_в_классификаторе>
    <Классификатор rdf:ID="Классификатор_3_Процессы"/>
  </редактируется_в_классификаторе>
  <rdfs:subClassOf rdf:resource="#Элементы_онтологии_организации"/>
</owl:Class>
<owl:ObjectProperty rdf:ID="обеспечивает_достижение">
  <rdfs:domain rdf:resource="#Процесс"/>
  <rdfs:range rdf:resource="#Цель"/>
  <редактируется_в_проекции>
    <Проекция rdf:ID="Проекция_3_Процессы_-_Цели"/>
  </редактируется_в_проекции>
</owl:ObjectProperty>
```

Полученная онтология с настройками форм ввода и редактирования может быть передана в редактор базы знаний, поддерживающий язык классификаторов и проекций. В редакторе на основе полученной онтологии будет сформирована структура модели, в которой останется только уточнить пиктограммы для классов и свойств, и можно переходить к наполнению. Наполненная в редакторе база знаний должна использоваться, для этого из нее формируются необходимые отчеты, и к ней обеспечивается доступ, например, через веб-портал (рис. 6).

Внедрение

Предложенная технология используется для формирования баз знаний о деятельности коммерческих предприятий и органов государственной власти в задачах проектирования организа-

ционной структуры, оптимизации бизнес- или административных процессов и формирования организационно-нормативной документации (регламенты деятельности, положения о подразделениях, должностные инструкции) [15].

С использованием системы разработано более 10 административных регламентов для Федеральной миграционной службы, Федеральной регистрационной службы, Федерального агентства по физической культуре и спорту, Федеральной службы по труду и занятости и других организаций. Коммерческими организациями-пользователями системы являются: Бизнес-Инжиниринг Групп, группа предприятий ГОТЭК, «Группа «Илим», Киришская ГРЭС, ЗАО «Евросиб», ОАО «Иркутскэнерго», ОАО «Газаппарат», «АСТРА Холдинг», Торговый дом «Петровский», Холдинг ПЕКАР и др. Разработкой и сопровождением



Рис. 6. Комплексная система для разработки и использования баз знаний онтологического типа



Рис. 7. Фрагмент системы классов онтологии организации

модели предприятия (базы знаний) занимаются пользователи бизнес-аналитики, не владеющие специальными знаниями в области представления знаний. Масштаб создаваемых моделей достигает десятков тысяч элементов, например, классификатор функций на одном из предприятий включал более 20 000 позиций.

Оценка эффективности предложенной технологии

Для оценки эффективности предложенной технологии сравним ее с наиболее распространенным средством наполнения баз знаний – через формы, см. редактор экземпляров (The instance editor) в редакторе онтологий Protégé² или семантические формы (semantic forms) в системе Semantic MediaWiki³.

Для проведения эксперимента возьмем задачу установления связей между наборами экземпляров двух классов, в частности, между Бизнес-процессами и Целями, достижение которых они обеспечивают (связь многие ко многим). Данные понятия и связи между ними входят в онтологию организации. Установление указанных связей между экземплярами понятий является типовой задачей при моделировании организаций (рис. 7).

Для установления связей между «Процессом нижнего уровня 1.1.2» и «Целью 1.2» и «Целью 1.4» в предлагаемой системе ОРГ-Мастер (рис. 8) требуется *пять действий* (нажатий кнопки мыши):

- 1) выбор «Процесса нижнего уровня 1.1.2» в левом классификаторе;
- 2) выбор «Цели 1.2» в правом классификаторе;
- 3) установление связи между выбранными объектами путем нажатия на значок «Назначить связь»;

- 4) выбор «Цели 1.4» в правом классификаторе;

- 5) установление связи между выбранными объектами путем нажатия на значок «Назначить связь».

Рассмотрим теперь решение этой задачи с помощью форм в стандартном редакторе онтологий (рис. 9). Для установления связей между «Процессом нижнего уровня 1.1.2» и «Целью 1.2» и «Целью 1.4» в редакторе экземпляров системы Protégé требуется *семь действий* (нажатий кнопки мыши):

- 1) выбор «Процесса нижнего уровня 1.1.2» в навигаторе экземпляров (Instance browser);
- 2) нажатие кнопки «Добавить из имеющихся» («Add ...»);
- 3) выбор «Цели 1.2» из списка экземпляров класса «Цель»;
- 4) установление связи – нажатие кнопки «ОК» в окне выбора;
- 5) нажатие кнопки «Добавить из имеющихся» («Add ...»);
- 6) выбор «Цели 1.4» из списка экземпляров класса «Цель»;
- 7) установление связи – нажатие кнопки «ОК» в окне выбора.

В результате предлагаемая технология позволяет решать представленную типовую задачу на 28 % быстрее.

Кроме количественных можно отметить качественные преимущества предложенной технологии. В случае увеличения масштаба базы знаний (например, при моделировании организаций количество процессов исчисляется сотнями) при использовании форм усложняется поиск нужного экземпляра класса в линейном списке. Хотя редакторы экземпляров обычно предоставляют возможность поиска по ключевым словам, это часто не помогает – поиск по ключевым словам полезен тогда, когда пользователь точно знает, что он ищет, а когда имеет приблизительные представления, лучше работает поиск по каталогу (навигация) [18, 19]. В предлагаемой технологии вы-

² http://protegewiki.stanford.edu/wiki/PrF_UG_inst_instance_editor

³ http://semantic-mediawiki.org/wiki/Semantic_Forms

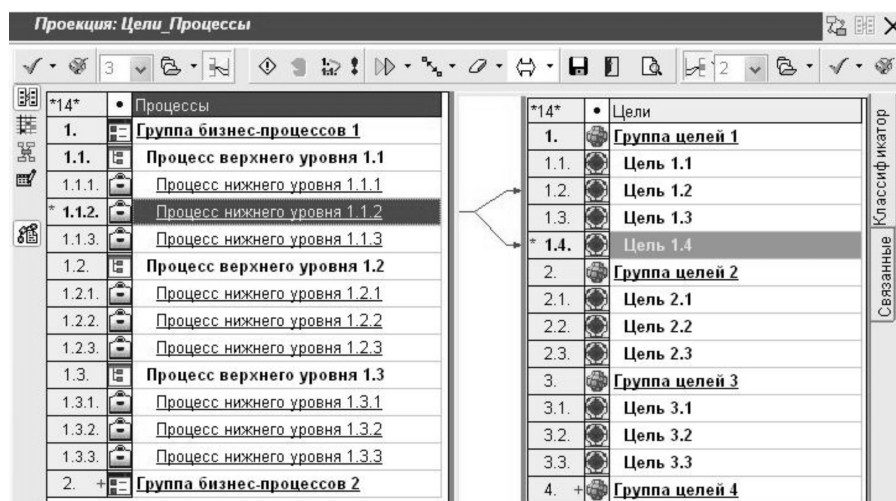


Рис. 8. Наполнение онтологии (установление связей) в предлагаемой системе наполнения баз знаний онтологического типа

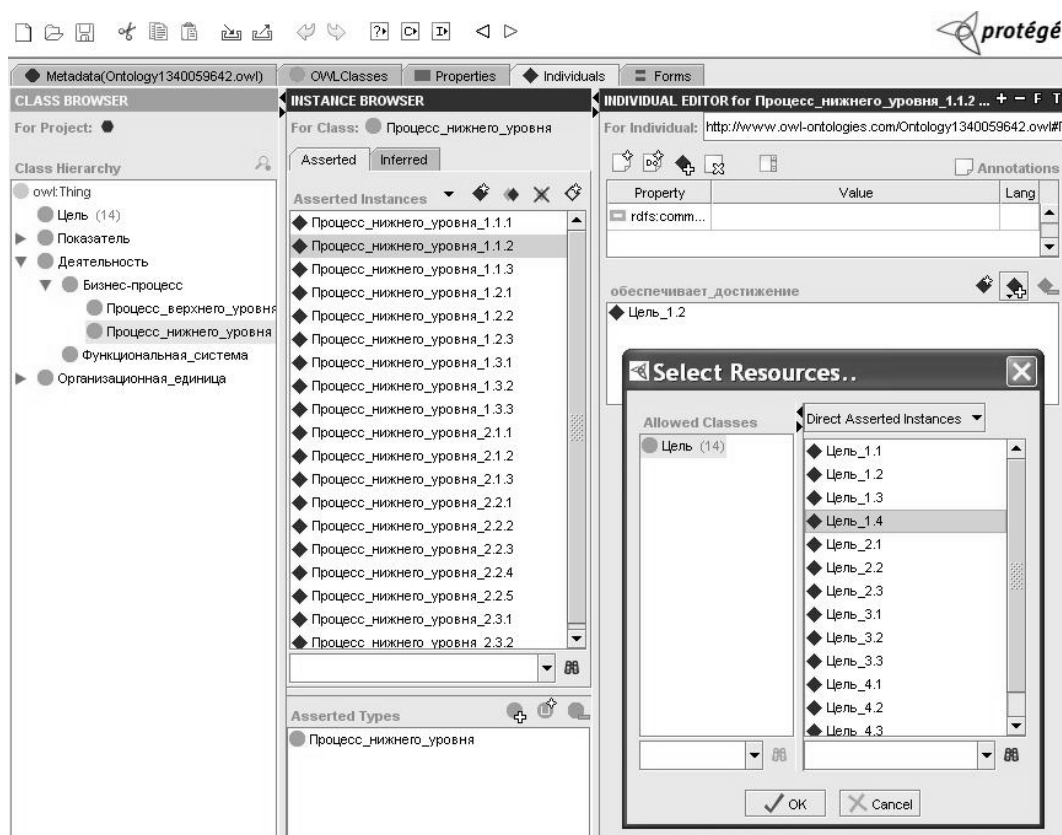


Рис. 9. Наполнение онтологии (установление связей) в стандартном редакторе экземпляров

бор экземпляров классов для установления связей осуществляется путем навигации по иерархическим спискам (классификаторам), а не только (и не столько) поиском по ключевым словам. Такая возможность делает редактор средством рассуждения для пользователя. Кроме того, выбор объ-

ектов путем навигации по иерархическим спискам (классификаторам) обеспечивает целостное восприятие предметной области [20].

В статье предложены язык классификаторов и проекций для наполнения баз знаний онтологиче-

ского типа и его программная поддержка. Показан механизм настройки интерфейса пользователя-разработчика базы знаний, основанный на стандартном языке представления онтологий OWL, который может быть реализован в стандартных редакторах онтологий. Кроме того, предложен подход к созданию комплексной системы для разработки и использования баз знаний онтологического типа, объединяющий разработанный редактор базы знаний со стандартными инструментами разработки онтологий и средствами предоставле-

ния доступа к знаниям (запросный поиск, навигация, частные представления знаний, порталы). Новизна работы, в первую очередь, заключается в уникальном языке классификаторов и проекций для формирования баз знаний онтологического типа, объединяющем возможности современных средств визуализации онтологий с подходами к ручному наполнению онтологий. Результаты работы апробированы и внедрены в практику. Проведена сравнительная оценка предложенной технологии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гаврилова, Т.А.** Онтологический подход к управлению знаниями при разработке корпоративных информационных систем [Текст] / Т.А. Гаврилова. –Новости искусственного интеллекта. –2003. –№ 2. –С. 24.
2. **Гаврилова, Т.А.** Модели и методы формирования онтологий [Текст] / Т.А. Гаврилова, Д.В. Кудрявцев, В.А. Горовой // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. –2006. –№ 46. –С. 21–28.
3. **Davies, J.** Towards the Semantic Web: Ontology-driven Knowledge Management [Text] / Eds. J. Davies, D. Fensel, F. van Harmelen, – England: John Wiley and sons Ltd, 2003.
4. **Brickley, D.** RDF Vocabulary Description Language 1.0: RDF Schema W3C Recommendation [Электронный ресурс] / D. Brickley, R.V. Guha. –10.02.2004. –Режим доступа: <http://www.w3.org/TR/rdf-schema/>
5. **Dean, M.** OWL Web Ontology Language Reference [Электронный ресурс] / Eds M. Dean, G. Schreiber, F. van Harmelen [et al.]. –Режим доступа: <http://www.w3.org/TR/owl-ref/>
6. **Grove, M.** RDF Instance Creator (RIC) [Электронный ресурс] / M. Grove. –2009. –Режим доступа: <http://www.mindswap.org/~mhgrove/RIC/RIC.shtml>
7. **Palmer, M.** Conzilla - a Conceptual Interface to the Semantic Web [Text] / M. Palmer, A. Naeve // Lecture notes in computer science 3596, 2005. –Vol. 136.
8. **Berners-Lee, T.** Tabulator Redux: Writing Into the Semantic Web [Text] / T. Berners-Lee [et al.] // Technical Report. –University of Southampton Electronics and Computer Science, 2007.
9. **Kelly, S.** Domain-Specific Modelling: Enabling Full Code Generation [Text] / S. Kelly, J. Tolvanen // Wiley-IEEE Computer Society Press. –2008. –448 p.
10. **Павлинов, А.А.** О средствах разработки проблемно-ориентированных визуальных языков [Текст] / А.А. Павлинов, Д.В. Кознов, А.Ф. Перегудов [и др.] // Системное программирование. –2006. –Т. 2. –№ 1. –С. 116–141.
11. **Сорокин, А.В.** Обзор eclipse modelling project [Текст] / А.В. Сорокин, Д.В. Кознов // Системное программирование. –2010. –Т. 5. –№ 1. –С. 6–32.
12. **Krotzsch, M.** Semantic MediaWiki [Текст] / M. Krotzsch, D. Vrandečić, M. Volkel // Proc. of the V International Semantic Web Conf. (ISWC06). –2006. –P. 935–942.
13. **Schaffert, S.** IkeWiki: A Semantic Wiki for Collaborative Knowledge Management [Текст] / S. Schaffert // Proc. of the I International Workshop on Semantic Technologies in Collaborative Applications (STICA 6). –2006.
14. **Григорьев, Л.Ю.** Визуальный язык классификаторов и проекций для разработки баз знаний [Текст] / Л.Ю. Григорьев, Д.В. Кудрявцев // Труды XII Национальной конф. по искусственному интеллекту (КИИ-2010). –Тверь, 2010. –Т. 2.
15. **Григорьев Л.Ю.** Организационное проектирование на основе онтологий: методология и система ОРГ-Мастер [Текст] / Л.Ю. Григорьев, Д.В. Кудрявцев // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. –2012. –№ 1. –С. 21–29.
16. **Katifori A.** Ontology visualization methods - a survey [Текст] / A. Katifori, C. Halatsis, G. Lepouras [et al.] // ACM Comput. Survey. –2007. –Vol. 39(4).
17. **Кудрявцев, Д.В.** Настройка форм для визуального наполнения онтологий [Текст] / Д.В. Кудрявцев // Сб. трудов конф. Управление знаниями и технологии семантического веба - 2010. –СПб.: Изд-во СПбГУИТМО, 2010. –С. 135–142.
18. **Spencer, D.** Four Modes of Seeking Information and How to Design for Them: [Электронный ресурс] / D. Spencer 19.06.122006/03/14. –Режим доступа: http://www.bboxesandarrows.com/view/four_modes_of_seeking_information_and_how_to_design_for_them
19. **Кудрявцев, Д.В.** Системы управления знаниями и применение онтологий: Учеб. пособие [Текст] / Д.В. Кудрявцев. –СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. –343 с.
20. **Гаврилова, Т.А.** Когнитивный подход к созданию онтологии [Текст] / Т.А. Гаврилова, А.В. Воинов // Научно-техническая информация. Сер. 2 Информационные процессы и системы. –2007. –№ 3. –С. 19–23.

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ БИЗНЕС-ПРОЦЕССА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СЕРВИСА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Создание систем имитационного моделирования (СИМ) – одно из перспективных направлений развития систем принятия решений. Наблюдается существенный интерес к области мультиагентных систем (МАС), спецификой которых является наличие сообществ взаимодействующих агентов, отождествляющихся с лицами, принимающими решения (ЛПР) [3]. Важная область применения мультиагентных технологий – моделирование. Подходы к проектированию МАС разделяют на две группы: базирующиеся на объектно-ориентированных методах и технологиях и использующие традиционные методы инженерии знаний [1].

Статья посвящена вопросам имитационного моделирования бизнес-процессов (БП). Характерная особенность программного обеспечения имитационного моделирования (ИМ) – ориентированность на пользователей-программистов, что создает значительные трудности для участия в создании и эксплуатации моделей пользователей,

не обладающих навыками программирования, но являющихся специалистами в своей области.

В настоящее время коммерческие продукты, представленные на рынке (AnyLogic, ARIS, G2), являются Desktop-приложениями. Система ARIS позволяет формировать html-страницы с результатами экспериментов и выгружать их в Интернет. Система AnyLogic способна компилировать java-апплеты с разработанными моделями и размещать их в Сети. Для начала работы с моделью необходимо выполнить ее полную загрузку на электронное устройство пользователя, проигрывание имитационного эксперимента апплета модели происходит на устройстве пользователя и требует существенных вычислительных ресурсов.

Сравнительный анализ систем (табл. 1) показал, что наибольшей функциональностью СИМ бизнес-процессов обладают продукты AnyLogic, BPsim. В направлении сервисно-ориентированной архитектуры развивается только G2. Таким образом, актуальной является задача выбора динами-

Таблица 1

Сравнительный анализ СИМ БП

Параметр	ARIS	G2	AnyLogic	BPsim
1. Проектирование концептуальной модели предметной области	НЕТ	НЕТ	НЕТ	+
2. Язык описания процессов преобразования ресурсов (БП)				
2.1. Описание ресурсов, средств, преобразователей	+	+	+	+
2.2. Иерархическая модель БП	+	+	+	+
3. Мультиагентная модель	НЕТ	НЕТ	+	+
4. Имитационное моделирование	+	+	+	+
5. Экспертное моделирование	НЕТ	+	НЕТ	+
6. Web-интерфейс	НЕТ	НЕТ	НЕТ	НЕТ
7. Облачные вычисления	НЕТ	+	НЕТ	НЕТ
8. Ориентированность на непрограммирующего пользователя	+	НЕТ	НЕТ	+
9. Стоимость, тыс. долл. США	50	70	13	7

ческой модели бизнес-процесса и построение на ее основе SaaS-сервиса ИМ.

Особенности бизнес-процессов

С точки зрения динамической составляющей БП можно выделить следующие основные требования к моделям [2–4]: 1) учет различных типов ресурсов; 2) учет состояния операций и ресурсов в конкретные моменты времени; 3) учет возникновения конфликтов на общих ресурсах и средствах; 4) моделирование дискретных процессов; 5) учет сложных ресурсов (экземпляров ресурсов со свойствами, в терминологии систем массового обслуживания – заявка (транзакт)); 6) применение ситуационного подхода (наличие языка описания ситуаций (языка представления знаний) и механизмов диагностирования ситуаций и поиска решений (механизма логического вывода согласно терминологии экспертных систем (ЭС)); 7) реализация интеллектуальных агентов (моделей ЛПР); 8) описание иерархических процессов.

Анализ существующих моделей бизнес-процессов

С точки зрения динамического моделирования бизнес-процессов рассмотрим следующие модели: модель мультиагентного процесса преобразования ресурсов [3–5]; SIE-модель А.Ю. Филипповича [6]; модели активных и пассивных преобразователей Б.И. Клебанова, И.М. Москалева [7].

Модель мультиагентных процессов преобразования ресурсов. Динамическая модель мультиагентных процессов преобразования ресурсов (МППР) [3] разработана на основе модели процесса преобразования ресурсов (ППР) [4] и предназначена для моделирования организационно-технических, БП и поддержки принятия управленческих решений.

Модель ППР разработана на основе следующих математических схем: сетей Петри, систем массового обслуживания и моделей системной динамики. Ключевым понятием модели ППР является преобразователь ресурсов, имеющий следующую структуру: вход, запуск, преобразование, управление, выход. «Запуск» определяет момент запуска преобразователя на основании состояния процесса преобразования, входных и выходных ресурсов, команд управления, средств. В момент запуска определяется время выполнения преобразования на основании параметров

команды управления и имеющихся ресурсных ограничений.

Модель МППР обладает иерархической структурой, которая описывается с использованием системных графов высокого уровня интеграции. Агенты управляют объектами процесса преобразования на основе содержания базы знаний (БЗ). Агент модели МППР имеет гибридную архитектуру InteRRap [5].

Модель МППР полностью соответствует всем предъявляемым требованиям, на ее основе разработана мультиагентная СППР BPsim.DSS [5].

Анализ SIE-модели А.Ю. Филипповича. Интегрированная ситуационная, имитационная, экспертная модель А.Ю. Филипповича (SIE-модель) представлена в работе [6]. В силу того, что данная модель ориентирована на проблемную область допечатных процессов (полиграфии), отдельные ее фрагменты изложим в терминах модели ППР.

SIE-модель представлена в виде нескольких различных уровней, соответствующих имитационному, экспертному и ситуационному представлению информации [6].

Первый уровень модели предназначен для описания структуры системы. Для этого каждому объекту (субъекту) сопоставляется блок. Все блоки соединяются между собой каналами взаимодействия. По этим каналам могут перемещаться динамические объекты (транзакты). Каждый блок определенное время обрабатывает транзакт и задерживает его на время, которое определяется интенсивностью работы устройства. Блоки не изменяют характеристики транзактов.

В мультиагентной ситуационной модели ППР [3] транзактам и блокам SIE-модели соответствуют ресурсы (Res, Order, Message) и преобразователи (Op, PR, Junction, Sender, Resiver) с учетом того, что они могут изменять характеристики транзактов.

Для описания событий, которые могут возникать в результате обработки транзактов, изменения состояний объектов и поступления внешней информации, используется второй уровень SIE-модели, называемый *событийным*. Третьим уровнем SIE-модели является *ситуационный*. Он предназначен для укрупненного моделирования системы. Каждому объекту на структурном уровне сопоставляется микроситуация. Ситуационное моделирование заключается в задании некоторых характеристик, отдельных ситуаций и в опреде-



лении с помощью ЭС оказываемых влияний. Для описания объектов в БЗ, отношений между объектами и в качестве языка машины логического вывода на экспертном уровне SIE-модели используется специальный ситуационный язык, базирующийся на логике предикатов первого порядка и фреймах [6].

Анализ SIE-модели позволяет сформулировать следующие выводы:

1) SIE-модель, предложенная А.Ю. Филипповичем, может служить базой для создания мультиагентной модели БП;

2) модель имеет следующие достоинства: аппарат/механизм диагностирования ситуаций; сочетание имитационного, экспертного и ситуационного подходов;

3) SIE-модель не удовлетворяет следующим требованиям мультиагентной модели БП: наличию модели ЛПР (агента) и сообществ агентов; проблемной ориентации на бизнес-процессы.

Модель И.М. Москалева, Б.И. Клебанова. В работе И.М. Москалева, Б.И. Клебанова [7] представлена математическая модель ППР, спецификой которой является выделение пассивных и активных преобразователей. Основой данной модели послужила модель дискретного процесса преобразования ресурсов [4] и ее расширение мультиагентным подходом [3]. В общем случае смешанная модель ППР, включающая активные и пассивные преобразователи, представима в виде графа. В такой модели вершины графа X образуют пассивные преобразователи, активные преобразователи, парки средств и хранилища ресурсов, а множество дуг представлено ресурсными и информационными потоками, потоками на средства.

Модель активных и пассивных преобразователей ориентирована на решение задач планирования производства и опирается на теорию составления расписаний. У данной модели не проработана возможность реализации интеллектуальных агентов (моделей ЛПР) с продукционной БЗ, а также реализация языка описания ситуаций и механизмов диагностики ситуаций и поиска решений.

Результаты анализа рассмотренных подходов и моделей динамического моделирования ситуаций приведены в табл. 2.

Как следует из таблицы, всем требованиям модели мультиагентного бизнес-процесса отвечает модель МППР. Также в качестве теоретической основы реализованного метода можно использовать SIE-модель, достоинством которой является проработка вопросов интеграции имитационного, экспертного и ситуационного моделирования.

Прототип SaaS-сервиса имитационного моделирования

За основу сервиса имитационного моделирования взята трехуровневая архитектура, состоящая из следующих элементов: клиентской части, агента мониторинга, сервера имитационного моделирования, базы данных сервера имитационного моделирования.

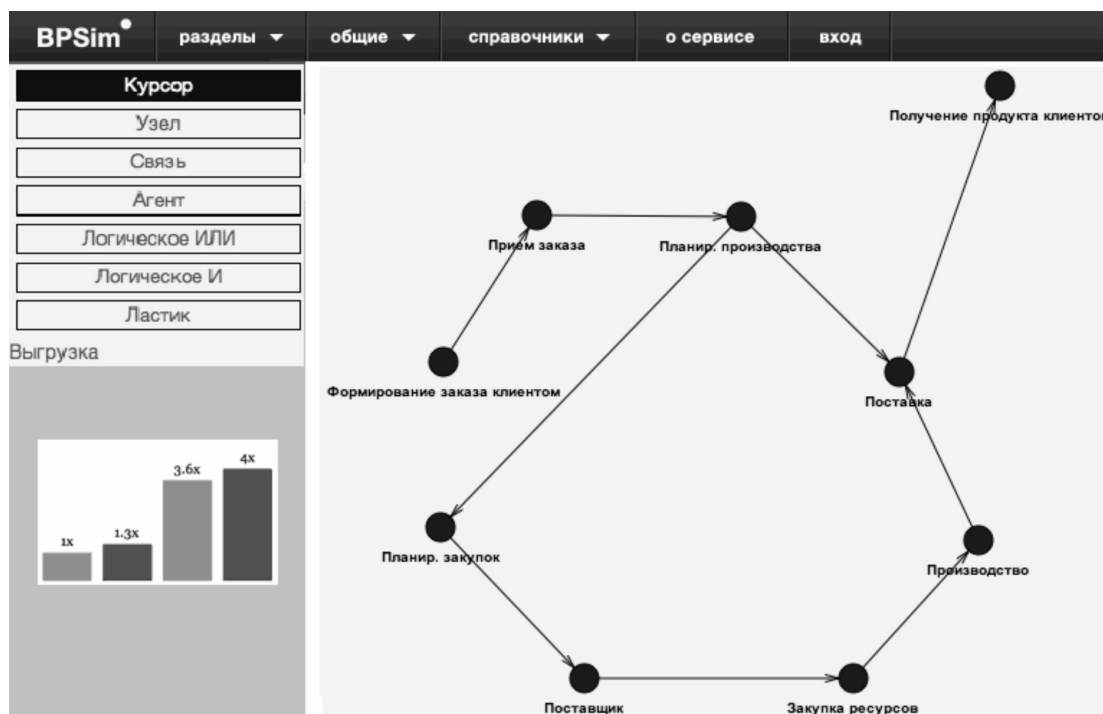
Дизайн приложения спроектирован и адаптирован под наиболее распространенные браузеры пользователей (см. рис.).

Полученные данные позволили провести анализ текущего развития систем имитационного моделирования бизнес-процессов (таких, как AnyLogic, ARIS, BPsim, G2) и выделить требова-

Таблица 2

Анализ подходов и динамических моделей ситуаций

Параметр	МППР	SIE-модель	Модель активных и пассивных преобразователей
1. Различные типы ресурсов	+	+	+
2. Учет временных характеристик	+	+	+
3. Конфликты на общих ресурсах и средствах	+	+	+
4. Операция дискретная	+	+	+
5. Сложный ресурс (заявка), очередь заявок	+	+	+
6. Язык описания ситуаций, диагностика ситуаций и поиск решений	+	+	НЕТ
7. Модель ЛПР (ИА)	+	НЕТ	НЕТ



Интерфейс при работе с моделью БП

ния к новой системе, ориентированной на работу в Интернете. Проведен сравнительный анализ существующих моделей динамических БП и взята за основу модель мультиагентного процесса

преобразования ресурсов. Проведена разработка прототипа SaaS-сервиса имитационного моделирования бизнес-процессов.

Работа выполнена в рамках госконтракта 02.740.11.0512.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Андрейчиков, А.В.** Интеллектуальные информационные системы: Учебник [Текст] / А.В. Андрейчиков, О.Н. Андрейчикова. –М.: Финансы и статистика, 2004. –424 с.
2. **Швецов, А.Н.** Модели и методы построения корпоративных интеллектуальных систем поддержки принятия решений: Дис. ... д-ра техн. наук [Текст] / А.Н. Швецов. –СПб., 2004. –461 с.
3. **Аксенов, К.А.** Динамическое моделирование мультиагентных процессов преобразования ресурсов [Текст] / К.А. Аксенов, Н.В. Гончарова. –Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2006. –311 с.
4. **Аксенов, К.А.** Исследование и разработка средств имитационного моделирования дискретных процессов преобразования ресурсов: Дис. ... канд.

техн. наук [Текст] / К.А. Аксенов. –Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2003. –188 с.

5. **Аксенов, К.А.** Разработка и применение объектно-ориентированной системы моделирования и принятия решений для мультиагентных процессов преобразования ресурсов [Текст] / К.А. Аксенов, И.И. Шолина, Е.М. Сафрыгина // Научно-технические ведомости СПбГПУ. –2009. –№ 80. –С. 87–97.

6. **Филиппович, А.Ю.** Интеграция систем ситуационного, имитационного и экспертного моделирования [Текст] / А.Ю. Филиппович. –М.: ООО Эликс+, 2003. –310 с.

7. **Москалев, И.М.** Система анализа и оптимизации процессов преобразования ресурсов: Дис. ... канд. техн. наук [Текст] /И.М. Москалев. –Екатеринбург, 2006. –170 с.



УДК 681.5.017

А.И. Писарев, Е.В. Костин

МЕТОД ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПЛАВКИ МЕДНОГО НИКЕЛЬСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ В ПЕЧАХ ВАНЮКОВА

Печь Ванюкова (ПВ) представляет собой агрегат (рис. 1) непрерывного действия, предназначенный для плавки сульфидного сырья с целью получения штейнов и шлаков с заданным содержанием меди [1–5]. Компоненты перерабатываемой шихты (богатая по содержанию сульфидов меди руда, отфильтрованный медный концентрат, бедные обороты, песчаник и т. д.) загружаются на поверхность интенсивно барботируемой шлако-штейновой ванны, где окисляются и перемешиваются кислородо-воздушной смесью (КВС). Данный процесс называют *процессом плавки в жидкой ванне (ПЖВ)* или *процессом Ванюкова*. Продуктами плавки являются медный штейн, шлак (отвалный или оборотный) и отходящие газы.

Обобщенная структурная схема управления процессом Ванюкова представлена на рис. 2. Автоматизированная система управления технологическим процессом (АСУТП) включает в себя контуры автоматического регулирования параметров дутья (расход и состав КВС) и загрузки печи.

Параметры, характеризующие состояние процесса Ванюкова, контролируются измерительными приборами АСУТП, либо определяются в результате химических анализов. Они формиру-

ют вектор состояния процесса Ванюкова $\mathbf{X} = \{x_i, i = 1, \dots, 12\}$, компоненты которого указаны ниже:

x_1 – содержание меди в штейне, %;

x_2 – содержание меди в шлаке, %;

x_3 – содержание кремнезема в шлаке, %;

x_4 – расход кислорода на плавку, $\text{нм}^3/\text{ч}$;

x_5 – содержание кислорода в КВС, %;

x_6 – расход КВС, $\text{нм}^3/\text{ч}$;

x_7 – давление КВС, кПа;

x_8 – расход природного газа на обогрев, $\text{нм}^3/\text{ч}$;

x_9 – расход металлосодержащих компонентов шихты, т/ч;

x_{10} – расход флюса, т/ч;

x_{11} – расход оборотных материалов, т/ч;

x_{12} – расход технологического кислорода на тонну металлосодержащих компонентов шихты ($\text{нм}^3/\text{т}$), который определяется по выражению

$$x_{12} = \frac{Q_{O_2}}{x_9 + x_{11}} = \left[\frac{\text{нм}^3}{\text{т}} \right],$$

где Q_{O_2} – расход технологического кислорода на

окисление сульфидов $Q_{O_2} = \frac{x_5 \cdot x_6}{100} - 2 \cdot x_8 = \left[\frac{\text{нм}^3}{\text{ч}} \right]$.

Исходя из материальных запасов и химического состава сырья, для каждой плавки формируется вектор режимных параметров процесса плавки $\mathbf{D} = \{d_i, i = 1, \dots, 5\}$. На основании теории

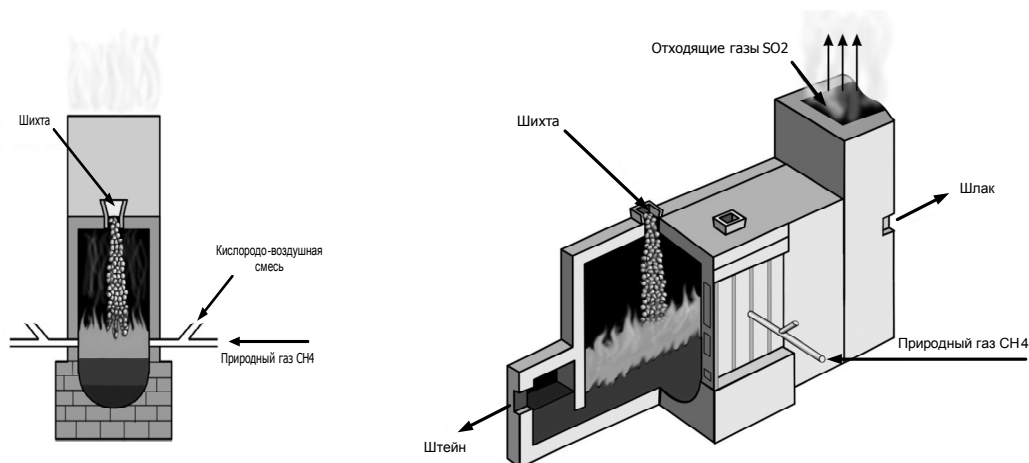


Рис. 1. Печь Ванюкова в разрезе

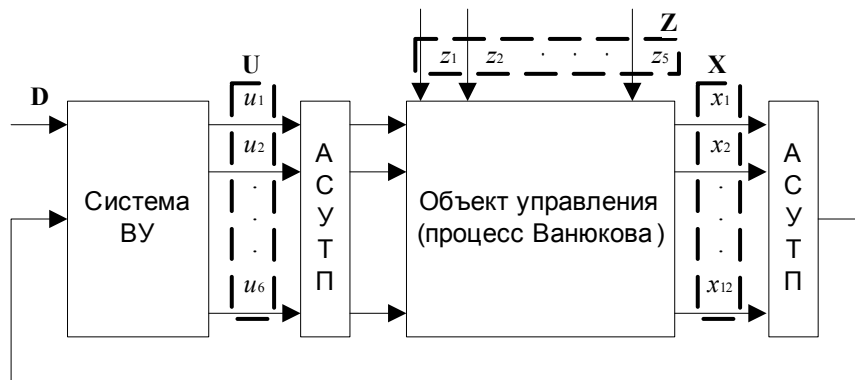


Рис. 2. Обобщенная структурная схема управления процессом Ванюкова:

D – вектор режимных параметров плавки; U – вектор управляющих сигналов;
 X – вектор переменных состояния процесса Ванюкова; Z – вектор возмущений,
действующих на объект управления

плавки в жидкой ванне [1–5] вектор режимных параметров можно представить следующими показателями:

- d_1 – содержание меди в штейне, %;
- d_2 – содержание меди в шлаке, %;
- d_3 – содержание кремнезема в шлаке, %;
- d_4 – суммарный расход кислорода на плавку, $\text{нм}^3/\text{ч}$;
- d_5 – количество штейна, т/ч.

Система верхнего уровня (ВУ) (см. рис. 2) вычисляет управляющие сигналы $U = \{u_i, i = 1, \dots, 6\}$, поступающие на контуры регулирования АСУТП. Вектор управляющих сигналов U представлен следующими компонентами:

- u_1 – расход металлосодержащих компонентов шихты, т/ч;
- u_2 – расход флюса, т/ч;
- u_3 – расход оборотных материалов, т/ч;
- u_4 – расход кислорода на плавку, $\text{нм}^3/\text{ч}$;
- u_5 – расход воздуха, $\text{нм}^3/\text{ч}$;
- u_6 – расход природного газа, $\text{нм}^3/\text{ч}$.

Следует отметить, что расход кислорода является режимным производственным параметром. В пределах одного режима плавки расход не изменяется. Он изменяется при переводе печи из одного режима в другой.

В процессе плавки на объект управления также действуют возмущения $Z = \{z_i, i = 1, \dots, 5\}$:

- z_1 – отклонение от номинала химического состава загружаемого сырья, %;
- z_2 – отклонение от номинала гранулометрического состава шихты, %;
- z_3 – отклонение от номинала давления кислорода, кПа;

z_4 – отклонение от номинала давления воздуха, кПа;

z_5 – отклонение от номинала давления природного газа, кПа.

Так как загрузка печи осуществляется непрерывно, а качество плавки контролируется дискретно, то можно ввести понятие периода плавки T – промежуток времени между двумя последовательными моментами контроля качества плавки. Управление процессом плавки осуществляется путем изменения значений вектора управляющих сигналов U с дискретностью управления Δt . Тогда число моментов управления (принятий решения) – $N = T/\Delta t$, а дискретное время управления $t_j = j \cdot \Delta t$, где $j = 0, 1, \dots, N-1$.

Под влиянием выбранного в момент времени t_j управления (принятого решения) печь переходит в новое состояние. Этот переход можно описать соотношением:

$$X(t_{j+1}) = f(X(t_j), U(t_j)). \quad (1)$$

Здесь $f(X, U)$ – n -мерная функция от n -мерного вектора X и m -мерного вектора U , характеризующая процесс Ванюкова, где $n = 12$, $m = 6$. Она представляет собой нейросетевую модель плавки и подробно описана в работах [6, 7]. Зададим еще начальное состояние процесса и обозначим его как $X(t_0)$.

В предложенной модели входными параметрами являются:

- содержание меди на предыдущем шаге $x_1(t_{j-1})$;
- расход металлосодержащих компонентов шихты $u_1(t_j)$;

расход флюсов на плавку $u_2(t_j)$;

расход технологического кислорода на тонну металлосодержащих компонентов шихты $x_{12}(t_j)$.

Рассмотрим далее многошаговый процесс управления процессом плавки [1–5].

Задача оптимального управления процессом Ванюкова заключается в отыскании такого вектора управления $\mathbf{U}$, который обеспечивал бы получение штейнов и шлаков с заданным химическим составом. Тогда физический смысл критерия качества можно сформулировать следующим образом: на протяжении периода плавки необходимо минимизировать суммарные потери по режимным параметрам, т. е.

$$J = \sum_{j=0}^{N-1} \left(\sum_{i=1}^L \alpha_i [x_i(t_j, \mathbf{U}(t_j)) - d_i]^2 \right) + F(\mathbf{X}(t_N)), \quad (2)$$

где L – количество режимных параметров; $F(\mathbf{X}(t_N))$ – точность приведения в конечное (оптимальное) состояние; α_i – весовые коэффициенты, учитывающие влияние режимных параметров на потери каждого шага управления процессом.

Очевидно, что $\sum_{i=1}^L \alpha_i = 1$.

Решение задачи оптимального управления процессом предлагается осуществлять методом динамического программирования Беллмана [8–11].

Введем понятие *значение критерия оптимальности* для момента времени t_j и управляющего воздействия $\mathbf{U}(t_j)$. Оно характеризуется суммарными потерями при плавке на j -м шаге управления:

$$S(t_j, \mathbf{U}(t_j)) = \sum_{i=1}^L \alpha_i [x_i(t_j, \mathbf{U}(t_j)) - d_i]^2. \quad (3)$$

Следуя принципу Беллмана, запишем рекуррентное уравнение для вычисления оптимального вектора управления для каждого шага:

$$\mathbf{U}(t_j) = \arg \min [S(t_j, \mathbf{U}(t_j)) + J(t_{j+1})], \quad (4)$$

где $J(t_{j+1})$ – значение критерия оптимальности на следующем шаге, которое определяется по выражению:

$$J(t_j) = \min [S(t_j, \mathbf{U}(t_j)) + J(t_{j+1})]. \quad (5)$$

Процедура вычисления оптимального вектора управления $\mathbf{U}(t_j)$ (5) включает в себя два этапа:

1. «попятная» процедура вычисления всех возможных оптимальных векторов управления, начиная с момента времени $t_N = N \cdot \Delta t$;

2. «прямая» процедура вычисления оптимального вектора управления, начиная с момента времени t_0 .

На рис. 3 показана структура расчета «попятной» процедуры.

В момент времени $t_N = N \cdot \Delta t$, будем считать, что заданное состояние процесса Ванюкова находится в оптимальной точке $J(t_N) = F(\mathbf{X}(t_N))$. Конечное и оптимальное состояние отображено в конце временной оси ($j = N$). Исходя из конечного состояния определяются все возможные векторы управляющих воздействий для момента времени t_{N-1} . Пусть q – количество возможных вариантов управления на момент времени t_j . Тогда векторы *возможных* управлений, состояний и критериев качества обозначим нижним индексом i и рассчитаем $\mathbf{U}_i(t_{N-1})$, $S_i(t_{N-1}, \mathbf{U}_i(t_{N-1}))$ и $J_i(t_{N-1})$ для каждого варианта $i = 1..q$.

Таким же образом рассчитываются управляющие воздействия, состояния процесса и значения критерия оптимальности для каждого пред-

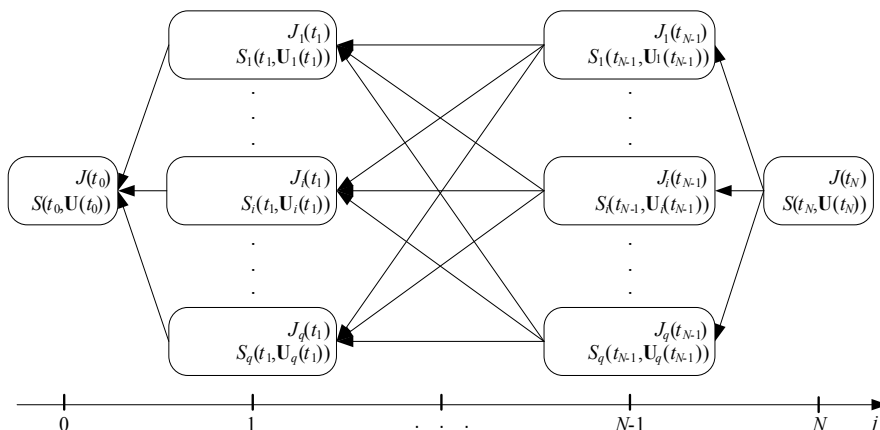


Рис. 3. Структурная схема расчета «попятной» процедуры

шествующего момента времени до момента t_0 . В результате определяются все возможные пути проведения процесса.

При вычислении «обратной» процедуры нет уверенности, что будет найден путь перехода системы из оптимального конечного состояния в начальное состояние, т. к. количество моментов дискретного управления N может оказаться недостаточным.

В связи с этим предлагается осуществлять поиск возможных путей управления из начального состояния. Для этого произведем следующие действия:

1) следуя из начального состояния, произведем перебор управляющих воздействий с некоторым шагом. При этом получим все возможные состояния системы для момента времени t_j ;

2) для каждого момента времени произведем группировку полученных вариантов по значению состояния печи (3). Объединять состояния в группы предлагается по критерию $|S_n - S_m| \leq \delta$, $n = 1..q$, $m = 1..q$, $n \neq m$, где δ – некоторый критерий точности группировки.

Если указанное выше условие выполняется, то можно сказать, что разные управляющие воздействия (с индексами n и m) приведут к одному и тому же состоянию печи. Из этого следует, что можно выбрать всего одно из управляющих воздействий (например, с индексом n), а соответственно уменьшить количество возможных вариантов управления q .

Предложенная выше группировка состояний процесса плавки уменьшает объем вычислений «прямой» процедуры. Основываясь на результатах «попятной» процедуры, «прямой» расчет подраз-

умеает процесс нахождения пути, обеспечивающего минимальное значение критерия оптимальности на весь период плавки. Структурная схема «прямой» процедуры отображена на рис. 4.

На структурной схеме состояния и пути их достижения, отображенные пунктирной линией, не являются оптимальными.

Пример расчета оптимального плана управления плавкой в печи Ванюкова. Исходные данные для расчетов. Начальное состояние печи Ванюкова $X(t_0)$ представлено следующими показателями:

1) содержание меди в штейне на предыдущем шаге $x_1(t_{i-1}) = 52,40 \%$;

2) расход металлосодержащих компонентов
шихты $u_1 = 10,9$ т/ч;

3) расход флюсов на плавку $u_2 = 11,9$ т/ч;

4) расход технологического кислорода на тонну металлосодержащих компонентов шихты $x_{12}(t_j) = 220 \text{ нм}^3/\text{т}$.

Регламентированное содержание меди в штейне составляет $d_1 = 60 \%$.

Моделирование осуществляется для $T = 60$ мин и $\Delta t = 15$ мин ($N = 4$) и критерия оптимальности только по содержанию меди в шейне $x_1(t_j)$:

$$J = \sum_{j=0}^{N-1} [x_1(t_j, \mathbf{U}(t_j)) - d_1]^2 + F(\mathbf{X}(t_N)). \quad (6)$$

Состояние печи рассчитывается по выражению:

$$S_i(t_{N-1}, \mathbf{U}_i(t_{N-1})) = [x_1(t_{N-1}, \mathbf{U}_i(t_{N-1})) - d_1]^2. \quad (7)$$

При заданных условиях отклонение от регламентированного значения содержания меди в штейне составляет $60,00 - 52,40 = 7,60$ %, а величина $S_i(t_{N-1}, U_i(t_{N-1}))$, характеризующая состоя-

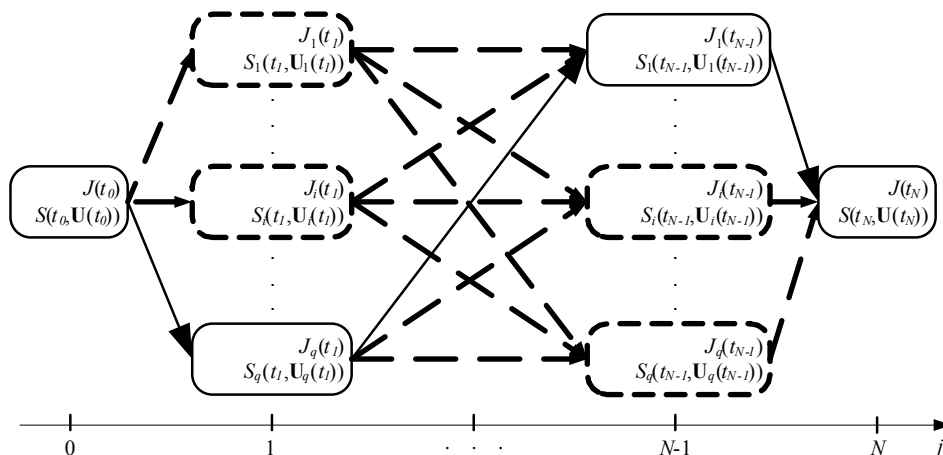


Рис. 4. Структурная схема расчета «прямой» процедуры



ние процесса, составляет $(7,60)^2 = 57,76$. Задача управления заключается в минимизации этого отклонения.

В соответствии с описанным выше алгоритмом получены следующие состояния печи Ванюкова (табл. 1).

Второй этап «попятной» процедуры подразумевает поиск всех путей (планов) достижения оптимума (6). В данном случае необходимо выбрать такой путь, который достигал бы наименьшего значения функционала на конечном шаге (60 мин). С помощью перебора всех возможных планов управления получено 168 вариантов, представленных в табл. 2.

Полученные варианты отсортированы по критерию качества, что позволяет определить оптимальный путь управления печью Ванюкова. Оптимальный план соответствует минимальному значению функционала (6). Путь с номером 168 позволяет достичь минимальных потерь в процессе плавки (13,59) при управлении.

Таким образом, основываясь на предварительных данных (табл. 1, 2) можно сформировать

оптимальный план управления печью Ванюкова на 60 мин вперед.

Начальный момент времени $t_0 = 0$ мин. В момент принятий решения осуществляется выбор вектора управляющих воздействий, позволяющий достичь содержания меди от начального 52,40 до 56,50 %. Для этого необходимо установить его значения $u_1 = 11,92$ т/ч, $u_2 = 20,54$ т/ч.

Момент времени $t_1 = 15$ мин. В данный момент времени выбирается вектор управляющих воздействий, позволяющий достичь содержания меди от 56,50 до 58,99 %. Для этого необходимо установить его значения $u_1 = 11,92$ т/ч, $u_2 = 10,86$ т/ч.

Момент времени $t_2 = 30$ мин. В данный момент времени выбирается вектор управляющих воздействий, позволяющий достичь содержания меди от 58,99 до 59,58 %. Для этого необходимо установить его значения $u_1 = 11,92$ т/ч, $u_2 = 10,86$ т/ч.

Момент времени $t_3 = 45$ мин. В данный момент времени выбирается вектор управляющих воздействий, позволяющий поддержать содержание меди на уровне 59,58 %. Для этого необ-

Таблица 1

Состояния печи Ванюкова

Момент времени, мин	Номер состояния	Входные параметры модели				x_1 , %	Состояние печи, S_i
		$x_1(t_{j-1})$, %	u_1 , т/ч	u_2 , т/ч	x_{12} , нм ³ /т		
15	1	52,40	82,96	13,28	58,34	54,14	34,29
	2	52,40	11,92	10,86	405,90	55,29	22,15
	3	52,40	29,68	10,86	163,05	55,85	17,22
	4	52,40	11,92	20,54	405,90	56,50	12,22
30	1	54,14	82,96	18,12	58,34	54,08	35,02
	2	54,14	11,92	10,86	405,90	55,29	22,15
	3	54,14	29,68	10,86	163,05	55,85	17,22
	4	54,14	11,92	18,12	405,90	56,50	12,22
	5	55,29	65,20	20,54	74,23	57,74	5,11
	6	56,50	11,92	10,86	405,90	58,99	1,02
45	1	54,08	82,96	18,12	58,34	54,08	35,02
	2	54,08	11,92	10,86	405,90	55,29	22,15
	3	54,08	29,68	10,86	163,05	55,85	17,22
	4	54,08	11,92	18,12	405,90	56,50	12,22
	5	55,29	65,20	20,54	74,23	57,74	5,11
	6	56,50	11,92	10,86	405,90	58,99	1,02
	7	58,99	11,92	10,86	405,90	59,58	0,17
60	1	54,08	82,96	18,12	58,34	54,08	35,02
	2	54,08	11,92	10,86	405,90	55,29	22,15
	3	54,08	29,68	10,86	163,05	55,85	17,22
	4	54,08	11,92	18,12	405,90	56,50	12,22
	5	55,29	65,20	20,54	74,23	57,74	5,11
	6	56,50	11,92	10,86	405,90	58,99	1,02
	7	58,99	11,92	10,86	405,90	59,58	0,17

Таблица 2

Возможные пути управления печью Ванюкова

Номер пути	Момент времени, мин	x_1 , %	Момент времени, мин	x_1 , %	Момент времени, мин	x_1 , %	Момент времени, мин	x_1 , %	Критерий качества, J_i
1	15	54,14	30	54,08	45	54,08	60	59,58	104,51
2	15	54,14	30	54,08	45	55,29	60	59,58	91,64
3	15	54,14	30	54,08	45	55,85	60	59,58	86,71
4	15	54,14	30	54,08	45	56,50	60	59,58	81,71
5	15	54,14	30	54,08	45	57,74	60	59,58	74,60
6	15	54,14	30	54,08	45	58,99	60	59,58	70,50
7	15	54,14	30	54,08	45	59,58	60	59,58	69,66
8	15	54,14	30	55,29	45	54,08	60	59,58	91,64
161	15	56,50	30	57,74	45	59,58	60	59,58	17,68
162	15	56,50	30	58,99	45	54,08	60	59,58	48,43
163	15	56,50	30	58,99	45	55,29	60	59,58	35,56
164	15	56,50	30	58,99	45	55,85	60	59,58	30,63
165	15	56,50	30	58,99	45	56,50	60	59,58	25,64
166	15	56,50	30	58,99	45	57,74	60	59,58	18,52
167	15	56,50	30	58,99	45	58,99	60	59,58	14,43
168	15	56,50	30	58,99	45	59,58	60	59,58	13,59

ходимо установить его значения $u_1 = 11,92$ т/ч, $u_2 = 10,86$ т/ч.

В конечный момент времени $t_4 = 60$ мин содержание меди в штейне составит 59,58 %, а точность приведения печи в конечное (оптимальное) состояние составит $F(X(t_N)) = 60,0 - 59,58 = 0,42$ % содержания меди в штейне.

Таким образом, оптимальный план управления позволит снизить отклонение от регламентированного значения содержания меди в штейне, которое в начальный момент времени составляло 7,60 до 0,42 %.

Предложен способ многошагового процесса управления плавкой в печах Ванюкова, основанный на методе динамического программирования Беллмана.

Особенность метода заключается в следующем: с целью уменьшения объема вычислений применяется группировка состояний процесса для j -го момента времени.

Произведен пример расчета управления по предложенному алгоритму. Результаты расчета показали рациональность принятых решений по управлению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ванюков, А.В. [Текст] / А.В. Ванюков, В.П. Быстров [и др.] // Цветная металлургия. –1994. –№ 9.
2. Гречко, А.В. [Текст] / А.В. Гречко [и др.] // Цветная металлургия. –1988. –№ 11.
3. Быстров, В.П. Исследование состава шлейношлаковой эмульсии при плавке в жидкой ванне [Текст] / В.П. Быстров, А.В. Ванюков, А.Д. Васкевич [и др.] // Цветные металлы. –1980. –№10. –С. 56–59.
4. Ванюков, А.В. Комплексная переработка медного и никелевого сырья: Ч. 1. [Текст] / А.В. Ванюков. –Алма-Ата: Наука, 1979. –210 с.
5. Ванюков, А.В. Плавка в жидкой ванне [Текст] / А.В. Ванюков. –М.: Металлургия, 1988.
6. Костин, Е.В. Нейросетевая модель процесса плавки медного никельсодержащего сырья в печах Ванюкова [Текст] / Е.В. Костин, А.И. Писарев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика.

- Телекоммуникации. Управление. –2012. –№1.
7. Костин, Е.В. Подготовка статистических данных для построения нейросетевой модели процесса плавки в печах Ванюкова [Текст] / Е.В. Костин, А.И. Писарев // Научный вестник НИИ. –2011. –№9.
8. Беллман, Р. Динамическое программирование [Текст]/Р. Беллман.–М.: Изд-во иностр. лит., 1960. –400 с.
9. Беллман, Р. Прикладные задачи динамического программирования [Текст] / Р. Беллман, С. Дрейфус. –М.: Наука, 1965. –458 с.
10. Беллман, Р. Динамическое программирование и современная теория управления [Текст] / Р. Беллман, Р. Калаба. –М.: Наука, 1969. –118 с.
11. Черноусько, Ф.Л. Динамическое программирование [Текст] / Ф.Л. Черноусько // Соросовский образовательный журнал. –1998. –№2.

МЕТОД ГЕНЕРАЦИИ ГРАФОВ ПОТОКОВ ДАННЫХ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ СИНТЕЗЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ДЛЯ НЕОДНОРОДНЫХ МНОГОЯДЕРНЫХ ПРОЦЕССОРОВ

Современные пакеты прикладных программ (ППП), направленные на решение задач обработки плотных числовых матриц, такие, как PLASMA [4], используют при выполнении программ модель потоков данных (dataflow model) [8]. В отличие от модели выполнения программы с явным потоком управления, при использовании модели потоков данных порядок выполнения фрагментов программы продиктован готовностью обрабатываемых данных. Использование модели потоков данных позволяет гибко подстраивать структуру процесса обработки данных под имеющиеся в системе ресурсы, что особенно актуально в связи с массовым распространением многоядерных процессоров.

В программах, использующих модель потоков данных для распределения вычислительной нагрузки, в качестве внутреннего представления используются крупногранулярные графы потоков данных, в которых узлы (акторы) соответствуют фрагментам решаемой задачи, а дуги отражают наличие зависимостей по данным [4, 5]. В случае,

когда программа предназначена для выполнения на неоднородном многоядерном процессоре с программируемым информационным обменом между различными модулями памяти (explicitly-managed memory hierarchy), оказывается полезным добавить в граф потоков данных узлы, представляющие пересылки фрагментов массивов данных [2]. Расширенные таким образом графы называются в статье *макропотоковыми графами*.

В указанных архитектурах вычислительные ядра процессора имеют «прозрачный» доступ только к своей локальной памяти, обладающей сравнительно малым размером (сотни килобайт), доступ к основной оперативной памяти осуществляется только с привлечением специализированных ядер, которые берут на себя пересылку. В силу малого размера локальной памяти возникает необходимость временной выгрузки промежуточных результатов в основную память. Данную архитектуру имеют следующие процессоры: Cell [9], отечественные процессоры семейства «Мультикор» [3] и др.

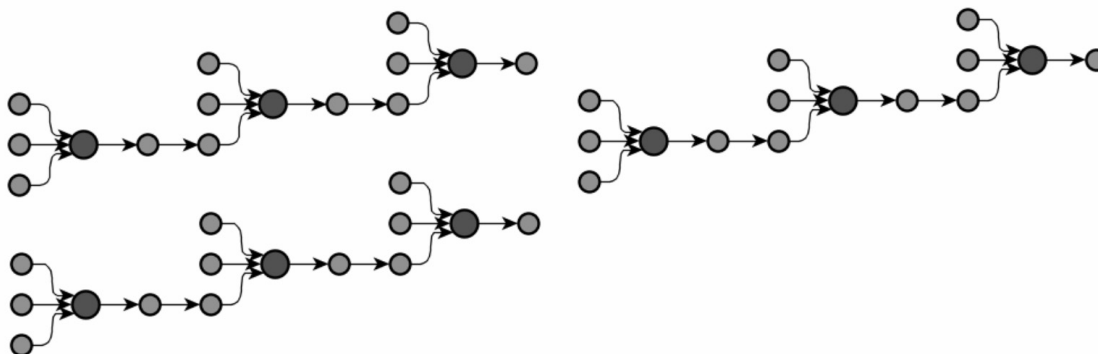


Рис. 1. Пример макропотокового графа

Макропоточковый граф – размеченный ориентированный ациклический граф потоков данных $G_A = \langle V_A, E_A \rangle$ с дополнительным разбиением всего множества акторов V_A на множество акторов передачи данных V_D и множество вычислительных акторов V_C . Правила срабатывания акторов такие же, как в модели статических потоков данных [8]. Разметка акторов позволяет адекватно описать процесс параллельной обработки блоков данных.

Представление параллельной программы в виде макропоточкового графа возможно для задач обработки клеточных матриц, которые можно сформулировать в виде совокупности алгебраических операций над их клетками [1], подпрограммы решения таких задач входят в состав широко известной библиотеки BLAS [11]. Ниже приведена формула в блочных обозначениях для задачи матрично-векторного умножения:

$$y_i' = \sum_{j=0}^{K-1} A_{ij} x_j + y_i \quad \forall i = 0, \dots, K-1, \quad (1)$$

где K – блочная размерность матрицы; A – ква-

дратная матрица, размерностью $K \times K$ блоков; векторы x и y имеют размерность $K \times 1$ блок; применяется согласованное разбиение [1] на клетки, максимальная размерность клетки матрицы – $NB \times NB$ элементов, размерность клетки вектора – $NB \times 1$ элемент, причем $NB < K$. Пример макропоточкового графа, соответствующего (1) при $K = 3 \cdot NB$, приведен на рис. 1. Более крупные вершины соответствуют вычислительным фрагментам параллельной программы, в то время как более мелкие – пересылкам клеток матриц и векторов.

В существующих ППП и средах поддержки параллельного программирования, таких, как Cilk [7] и CellSs [5] граф потоков данных генерируется постепенно, по ходу выполнения программы. Распределение ресурсов также производится параллельно с обработкой данных. Использование такой схемы приводит к высоким накладным расходам. Так, например, согласно [5] при выполнении матричного умножения более 88 % времени тратится на управление пулом заданий. Примерно 30 % времени занимает распределение ресурсов.

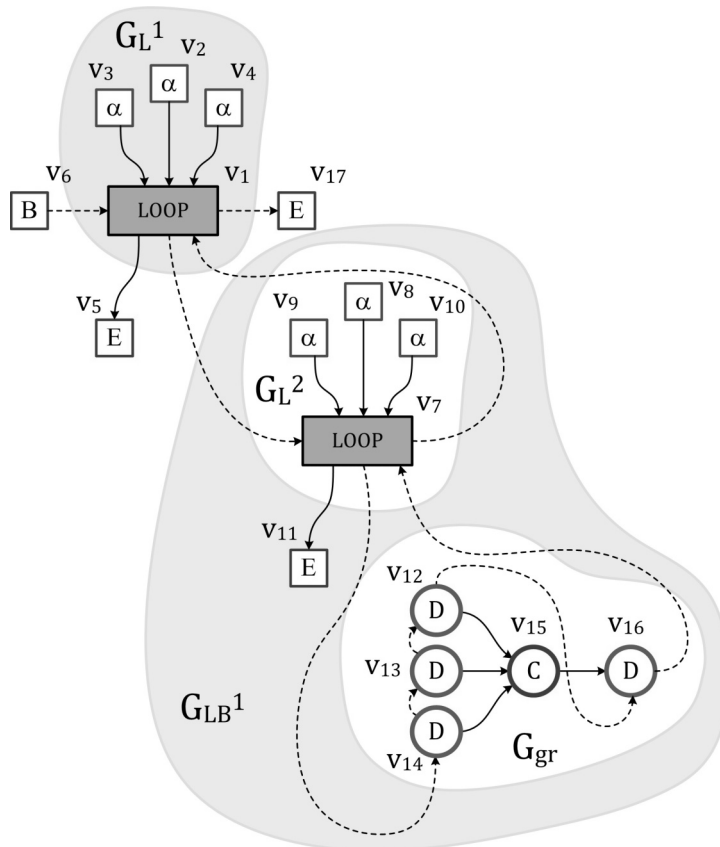


Рис. 2. Пример «свернутого» графа



Вычислительные ядра простаивают примерно 9 % времени. Программа матричного умножения перестает масштабироваться при четырех вычислительных ядрах процессора Cell [5, рис. 5]. Производительность программы матричного умножения на восьми вычислительных ядрах процессора Cell составляет примерно 71 % от пиковой [6], в то время как подпрограммы для вычислительных ядер способны работать с производительностью не менее 85 % [11].

В данной статье предложен новый подход, исключающий указанные затраты при выполнении программы. Суть подхода заключается в том, что макропоточковый граф генерируется до выполнения программы и служит ее внутренним представлением, которое используется для построения статического расписания. Для описанного ранее класса задач это оказывается возможным, поскольку на уровне вычислительных фрагментов структура графа не зависит от исходных данных и результатов промежуточных вычислений.

Следует отметить, что макропоточковый граф не всегда имеет столь простую структуру как граф, изображенный на рис. 1 (см., например, задачу решения СЛАУ с треугольной матрицей коэффициентов [1, 11]). В силу указанных причин разработано еще одно графовое представление, цель использования которого заключается в том, чтобы сделать возможным статическую генерацию макропоточкового графа для любого экземпляра обобщенной задачи (см., например, (1)), получаемого при подстановке значений числовых параметров, описывающих конфигурацию матриц.

В качестве представления обобщенной задачи обработки матриц предложено использовать «свернутые» графы. Ключевым элементом, на базе которого строится любой «свернутый» граф, является вершина-цикл (v_i). Назначение вершины-цикла заключается в представлении процесса перебора значений одной координатной переменной в формуле. Каждому квантору общности, а также каждому знаку сокращенной суммы (знак Σ) в формуле ставится в соответствие вершина-цикл. Каждому равенству ставится в соответствие подграф G_{gr} (рис. 2), представляющий подкачку исходных данных, вызов подпрограммы для их обработки и отвод результата. Остальные элементы добавляются в граф для обеспечения

дальнейшего преобразования в макропоточковый граф. Пример «свернутого» графа представлен на рис. 2. Данный граф соответствует задаче (1). Вершины, помеченные «LOOP» (v_1, v_7), являются вершинами-циклами. Вершины, помеченные « α » (v_2-v_4, v_8-v_{10}), задают множество значений координатных переменных i и j из (1). Вершины, помеченные «В» и «Е», а также дуги, инцидентные им, являются вспомогательными. Вершины, помеченные «D», являются акторами передачи данных, а те, что помечены «С» – вычислительными акторами. Дуги, помеченные пунктиром, являются вспомогательными.

Для построения «свернутого» графа по формуле F в блочных обозначениях (см., например, (1)) используется методика `CONSTRUCT_FOLDED_GRAPH`.

`CONSTRUCT_FOLDED_GRAPH(F)`

Добавить актор $v_b \in V$ и запомнить его

while в формуле F есть элементы **do**

if встретилась область действия $\forall$ **then**

Добавить подграф G_L , отражающий перебор значений координатной переменной и запомнить v_r , соответствующую $\forall$

Добавить связи с другими вершинами-циклами (v_i)

else if встретилось = без знака Σ **then**

Добавить G_{gr} и запомнить его

else if встретилось = со знаком Σ **then**

Добавить подграф G_L , отражающий перебор значений переменной суммирования и запомнить v_r , соответствующую Σ

Добавить связи с другими v_i

Добавить G_{gr}

Связать G_L и G_{gr} дугами

end if

Связать дугой последнюю пару запомненных элементов, если они не были связаны ранее

if закончилась область действия $\forall$ **then**

Связать дугой последний запомненный элемент и v_r , соответствующую $\forall$, и запомнить v_i

end if

end while

Добавить актор $v_e \in E$

Связать дугой последний запомненный элемент и v_e

При описании методики `CONSTRUCT_FOLDED_GRAPH` приняты следующие обозначения: V –

множество вершин, помеченных «В» на рис. 2; E – множество вершин, помеченных «Е» на рис. 2; G_{gr} – подграф, представляющий решение фрагмента задачи и организацию обмена блоками данных (подграф, включающий вершины $v_{12} - v_{16}$ и дуги, связывающие их на рис. 2); G_L – подграф, представляющий перебор значений координатной переменной, связанной квантором общности, либо являющейся переменной, по которой производится суммирование.

Каждой индивидуальной задаче ставится в соответствие кортеж параметров Ω , содержащий блочные размерности матриц по каждому измерению (K_i), гранулярность разбиения матриц (NB_j) по каждому измерению и пр. Указанный кортеж совместно со «свернутым» графом однозначно задает макропоточковый граф.

При синтезе макропоточкового графа производится последовательная «развертка» вершин-циклов. В процессе «развертки» одной вершины-цикла определяется «тело цикла» (подграф G_{LB}^1 на рис. 2 для вершины-цикла v_1). Затем определяется диапазон изменения соответствующей координатной переменной ($i..j$), после чего «тело цикла» «клонировается» k раз, где $k = (j - i) > 0$, т. е. в граф добавляются k подграфов, изоморфных G_{LB}^1 , а разметка акторов передачи данных в каждом подграфе, включая G_{LB}^1 , «конкретизируется» в соответствии со значением координатной переменной, соответствующим подграфу. Все подграфы связываются вспомогательными дугами в порядке следования значений координатной переменной друг с другом, и с теми вершинами, с которыми «разворачиваемая» вершина-цикл связана вспомогательными дугами (для вершины-цикла v_1 такими вершинами являются вершины v_6 и v_{17}). После этого из получившегося графа удаляются все вспомогательные дуги, связывающие вершину-цикл с другими вершинами, и удаляется слабосвязанная компонента графа, которой принадлежит v_1 .

После «развертки» вершин-циклов в получившемся графе производится «склейка» парных акторов передачи данных, первый из которых представляет выгрузку промежуточных результатов вычислений, а второй – загрузку указанных результатов в локальную память вычислительного ядра (акторы должны соответствовать передаче одной и той же клетки матрицы). Операция «склейки» заключается в добавлении дуги, подоб-

ной той, что соединяет актор передачи данных с вычислительным актором. «Развертка» вершин-циклов производится в определенном порядке, соответствующем просмотру формулы слева направо и вложенности скобок в ней.

Имеет место следующее утверждение (приведено без доказательства).

Лемма 1. Для любого «свернутого» графа G_B , построенного по формуле F с помощью методики `CONSTRUCT_FOLDED_GRAPH`, существует такая последовательность применения операций «развертки» вершин-циклов, которая обеспечивает возможность «развертки» каждой вершины-цикла вплоть до их исчерпания.

После того, как в графе будут исчерпаны вершины-циклы и будет произведена «склейка» всех пар акторов передачи данных, соответствующих друг другу, из получившегося графа удаляются все вспомогательные элементы (дуги и акторы, помеченные «В» и «Е»). В итоге получится макропоточковый граф, соответствующий рассматриваемой индивидуальной задаче.

Имеют место следующие утверждения.

Теорема 1. При использовании алгоритма синтеза макропоточкового графа по заданному кортежу параметров индивидуальной задачи Ω и соответствующему ему «свернутому» графу G_B , построенному по методике `CONSTRUCT_FOLDED_GRAPH`, всегда можно построить конечный макропоточковый граф G_A .

Доказательство. Поскольку множество значений любой из координатных переменных конечно (с учетом возможной зависимости между переменными и в силу леммы 1), после «развертки» любой вершины-цикла в графе будет присутствовать конечное число копий подграфов G_{LB} («тело цикла»). В силу леммы 1, после исчерпания всех вершин-циклов в итоговом графе будет присутствовать конечное число подграфов G_{gr} , вспомогательные дуги и два вспомогательных актора. В процессе «склейки» акторов передачи данных в граф будет добавлено конечное число дуг. Следовательно, теорема доказана.

Теорема 2. Построенный макропоточковый граф G_A является адекватным представлением индивидуальной задачи, которой соответствует формула F и кортеж параметров Ω .

Доказательство. Для доказательства теоремы необходимо установить, что для каждого набора значений координатных переменных и



каждого равенства в формуле в итоговом графе присутствует один подграф G_{gr} , а дуги соединяют подграфы G_{gr} таким образом, что целостность данных не нарушается.

Существование одного подграфа G_{gr} для каждого набора значений координатных переменных и каждого равенства следует из правила «развертки» вершины-цикла, представленного ранее, и конечности множества значений всех координатных переменных. При этом под «конкретизацией» разметки акторов передачи данных понимается указание значений координатной переменной, соответствующей «разворачиваемой» вершине-циклу.

Следует отметить, что каждому вхождению клетки матрицы в формулу ставится в соответствие дополнительный индекс по следующему правилу: каждое преобразование клетки (равенство, в левую часть которого она входит) увеличивает дополнительный индекс на единицу. Исходным клеткам приписывается нулевой индекс.

В процессе «склейки» для каждого актора подкачки данных v_{in} ищется парный актор отвода результатов (просмотр ведется по порядку от вспомогательного актора B по цепочке вспомогательных дуг до v_{in}). Парными считаются акторы, соответствующие передаче клеток одной матрицы, с одинаковыми координатами, причем значения дополнительного индекса должны совпадать. Нетрудно доказать, что не может быть больше одного парного актора. «Склейка» акторов, отно-

сящихся к сокращенной сумме, производится по цепочке сразу после развертки соответствующей вершины-цикла, при этом акторы остального графа не принимают участия в просмотре. Вершины-циклы, соответствующие сокращенным суммам в формуле, помечаются специальным флагом.

Дуги в итоговом графе соединяют все акторы таким образом, что выгрузка результатов предыдущих вычислений всегда предшествует их загрузке в локальную память; результаты промежуточных вычислений при необходимости передаются далее на обработку; выполнению обработки предшествует загрузка всех исходных данных в локальную память; по завершении обработки результаты выгружаются в основную память. Из сказанного следует, что структура итогового графа обеспечивает соблюдение целостности данных. Следовательно, теорема доказана.

Предложенный подход к генерации представления параллельной программы позволяет исключить временные накладные расходы, возникающие в ходе выполнения программы при использовании Cilk [7], CellSs [5] и других программных средств, основанных на динамической генерации графа заданий. В дальнейшем планируется разработка редактора для составления «свернутых» графов, программная реализация метода синтеза макропоточкового графа и их интеграция в разработанный автором пакет прикладных программ SAMPL [10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голуб, Дж. Матричные вычисления [Текст] / Дж. Голуб, Ч. ВанЛоун. – М.: Мир, 1999. – 548 с.
2. Недоводеев, К.В. Метод синтеза блочного алгоритма по его графовому представлению [Текст] / К.В. Недоводеев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2007. – Т. 2. – №4. – С. 141–148.
3. Солохина, Т. Сигнальные контроллеры компании «Элвис»: первая линейка отечественных DSP [Текст] / Т. Солохина, Ю. Александров, Я. Петричкович // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2005. – № 7. – С. 70–77.
4. Agullo, E. Numerical linear algebra on emerging architectures: The PLASMA and MAGMA projects [Text] / E. Agullo, J. Demmel, J. Dongarra [et al.] // J. of Physics: Conference Series. – 2009. – Vol. 180. – №. 1.
5. Bellens, P. CellSs: making it easier to program the Cell Broadband Engine processor [Text] / P. Bellens, J.M. Perez, R.M. Badia [et al.] // IBM J. of Research and Development. – 2007. – Vol. 51. – № 5. – P. 593–604.
6. Bellens, P. CellSs: scheduling techniques to better exploit memory hierarchy [Text] / P. Bellens, J.M. Perez, F. Cabarcas [et al.] // Scientific programming. – 2009. – Vol. 17. – Iss. 1-2. – P. 77–95.
7. Blumofe, R.D. Cilk: An Efficient Multithreaded Runtime System [Text] / R.D. Blumofe, C.F. Joerg, B.C. Kuszmaul [et al.] // J. of Parallel and Distributed Computing. – 1996. – Vol. 37. – №. 1. – P. 55–69.
8. Dennis, J.B. A preliminary architecture for a basic data-flow processor [Text] / J.B. Dennis, D.P. Misunas // Proc. of the II Annual symp. on Computer architecture. – Texas, Houston, 1974. – P. 126–132.
9. Kahle, J.A. Introduction to the Cell multiprocessor [Text] / J.A. Kahle, M.N. Day, H.P. Hofstee [et al.] // IBM J. of Research and Development. – 2005. – Vol. 49. – № 4/5. – P. 589–604.
10. Nedovodeev, K. Self-adapting software as a means

of meeting the multicore challenge [Text] / K. Nedovodeev
// Proc. of the VII Conf. of open innovations framework
program FRUCT. –SPb, 2010. –P. 83–86.

11. **Saxena, V.** Optimization of BLAS on the Cell

processor [Text] / V. Saxena, P. Agrawal, Y. Sabharwal
[et al.] // Proc. of the XV International Conf. on high
performance computing. –India, Bangalore, 2008.
–P. 18–29.

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ВЫБОР НА ОСНОВЕ МЕТОДА t -УПОРЯДОЧЕНИЯ

Рассматриваются многокритериальные задачи оптимизации объектов в традиционной постановке. Как известно, формальные решения таких задач связаны с построением множеств недоминируемых по вектору частных критериев вариантов – множеств Парето. Точки, оптимальные по Парето, называются также *эффективными решениями*. На практике возникает проблема сужения множества эффективных точек на основе дополнительной информации, поступающей от лица, принимающего решение (ЛПР). Эта информация может поступать в различном виде в зависимости от конкретной предметной области и возможностей ЛПР. В данной статье предполагается, что ЛПР в состоянии делать утверждения о равноценности некоторых частных критериев или о превосходстве по «важности» одного частного критерия по сравнению с другим. Далее приводятся формальные интерпретации изначально интуитивных утверждений ЛПР об относительной важности критериев. На их основе строится процедура сокращения множества Парето, обобщающая известный подход В.В. Подиновского [1].

Решается многокритериальная задача

$$f_i(x) \rightarrow \max, f_i: X \rightarrow R, i = \overline{1, m}, \quad (1)$$

где X – произвольное абстрактное множество. Предположим, что все критериальные функции (функционалы) f_i отражают «полезность» объекта с позиций различных критериев и являются соизмеримыми в том смысле, что значения каждой критериальной функции изменяются в одних и тех же пределах $[a, b]$:

$$\forall x \in X: 0 \leq a \leq f_i(x) \leq b, i = \overline{1, m}. \quad (2)$$

Таким образом, подразумевается, что оценочные шкалы критериев являются числовыми и одинаковыми.

Предположение о соизмеримости критериев является существенным и требует для каждой решаемой задачи отдельного обоснования и исследования.

Требование, связанное с необходимостью приведения всех числовых шкал к единому промежутку, выглядит весьма естественным и формально выполняется с помощью, например, следующих простых преобразований:

$$\overline{f}_i(x) = a + (b - a) \frac{f_i(x) - \min f_i}{\max f_i - \min f_i}. \quad (3)$$

Здесь $\max f_i, \min f_i$ – максимальные и минимальные значения f_i соответственно. Новые оценочные функции $\overline{f}_i$ будут изменяться уже в пределах заданного промежутка $[a, b]$. При этом наименее предпочтительный по любому из частных критериев вариант получит оценку « a », а наиболее предпочтительный – оценку « b ». Часто выбирают $a = 0, b = 1$. Могут использоваться и другие (может быть, нелинейные) формулы нормирования, аналогичные (3).

Многие полагают, что проблемы соизмеримости числовых критериев вовсе не существует. Достаточно воспользоваться любыми соотношениями типа (3). Однако это, к сожалению, не так. Рассмотрим конкретный пример, показывающий, что отношение доминирования, устанавливаемое в пространстве нормированных оценок, неинвариантно (из-за изменения нижних и верхних границ) относительно изменения рассматриваемой совокупности объектов X .

Пусть для трех объектов $X = \{x_1, x_2, x_3\}$ имеем следующие оценки по трем частным критериям $f = (f_1, f_2, f_3)$:

$$f(x_1) = (10, 10, 3); f(x_2) = (8, 8, 10); f(x_3) = (0, 0, 0).$$

Тогда для преобразованных оценок при

$[a, b] = [0, 1]$ получим

$$\bar{f}(x_1) = (1, 1, 0, 3); \quad \bar{f}(x_2) = (0, 8, 0, 8, 1), \\ \bar{f}(x_3) = (0, 0, 0).$$

Если предположить, что все три частных критерия равноправны и нас интересует средняя оценка для каждого объекта, то тогда

$$\bar{f}_1(x_1) + \bar{f}_2(x_1) + \bar{f}_3(x_1) = \\ = 2, 3 < \bar{f}_1(x_2) + \bar{f}_2(x_2) + \bar{f}_3(x_2) = 2, 6$$

и, следовательно, объект x_2 оказывается предпочтительнее объекта x_1 (по «средней полезности»).

Но если исключить объект x_3 , как наихудший по всем трем критериям, то получим обратное утверждение. Действительно, в этом случае

$$\bar{f}(x_1) = (1, 1, 0), \quad \bar{f}(x_2) = (0, 0, 1);$$

и

$$\bar{f}_1(x_1) + \bar{f}_2(x_1) + \bar{f}_3(x_1) = \\ = 2 > \bar{f}_1(x_2) + \bar{f}_2(x_2) + \bar{f}_3(x_2) = 1.$$

Получен обескураживающий результат. Если исходная совокупность объектов X содержит три объекта x_1, x_2, x_3 , то оказывается, что объект x_2 лучше, чем объект x_1 . Если исключить из рассмотрения (худший по всем критериям) объект x_3 , то получим, что объект x_1 оказывается лучше, чем объект x_2 . Безобидная на первый взгляд процедура нормирования оказывается на деле весьма сложной, т. к. приводит к явно антиинтуитивным результатам. Можно пытаться исправить ситуацию и, например, фиксировать верхние и нижние границы критериальных функций раз и навсегда (для данной задачи) независимо от конкретного набора объектов и их оценок. При этом мы получим однозначность, но ситуация в целом вряд ли улучшится, т. к. установленные границы, по существу, и будут определять соответствующее отношение доминирования, и в этом смысле произвол сохраняется.

Далее, однако, будем предполагать, что критериальные функции (или просто – критерии) соизмеримы и удовлетворяют условиям (2). В качестве примера изначально соизмеримых критериев можно привести систему школьных оценок по нескольким предметам f_i .

Определение 1. Нормированные критерии f_i и f_j называются равноценными (что записывается в виде $f_i \sim f_j$), если всякие две векторные оценки Z, W , где

$$Z = (z_1, \dots, z_i, \dots, z_j, \dots, z_m), \quad Z = f(x), \quad x \in X \\ W = (z_1, \dots, z_i + \delta, \dots, z_j - \delta, \dots, z_m) \quad (4)$$

одинаковы по предпочтительности при любом δ (большим или меньшим нуля), удовлетворяющим неравенствам $a \leq z_i + \delta \leq b, a \leq z_j - \delta \leq b$.

Видно, что суммы частных оценок в позициях i, j у векторных оценок Z, W совпадают.

Таким образом, если, например, два школьника оцениваются по четырем предметам и имеют оценки (которые необходимо максимизировать)

$$Z = (5, 4, 4, 3), \quad W = (5, 5, 3, 3), \quad (5)$$

то при условии равноценности критериев f_2, f_3 приведенные векторные оценки будут одинаковыми по предпочтительности, т. к. $4 + 4 = 5 + 3$, а остальные оценки совпадают.

Следовательно, если критерии f_i, f_j равноценны, то можно «забрать» δ единиц у частной оценки z_j и «передать» их частной оценке z_i . При этом получим векторную оценку, одинаковую по предпочтительности с исходной.

Если в приведенном примере считать, что оценка Z предпочтительнее, чем W , то естественно предположить, что критерий f_3 важнее критерия f_2 . Дадим соответствующее определение.

Определение 2. Критерий f_i более важен, чем критерий f_j (что записывается в виде $f_i \succ f_j$), если векторная оценка $Z = (z_1, \dots, z_i, \dots, z_j, \dots, z_m)$ менее предпочтительна, чем оценка $W = (z_1, \dots, z_i + \delta, \dots, z_j - \delta, \dots, z_m)$, где $\delta \in \{\delta > 0 \mid z_i + \delta \leq b, a \leq z_j - \delta\}$.

Таким образом, перенос δ единиц ($\delta > 0$) с частной оценки z_j на частную оценку z_i приводит к улучшению ситуации если $f_i \succ f_j$.

Определения 1, 2 показывают, как может интерпретироваться дополнительная ординальная (порядковая) информация пользователя (ЛПР) об относительной важности частных критериев, на основе которой и происходит сокращение множества Парето решаемой многокритериальной задачи. Важно понимать, что одна и та же ординальная информация, задаваемая в виде утверждений $f_i \succ f_j = f_k \succ f_p$ в других процедурах выбора может получать совершенно иную интерпретацию, что, в свою очередь, может приводить и к другим системам предпочтений, и к другим результатам выбора.

Приведенные в определениях 1, 2 интерпретации ординальной информации ЛПР позволяют строить отношения доминирования более силь-



ные, чем отношение Парето (что и приводит к сужению последнего, а это наша основная задача). Рассмотрим пример.

Пусть $Z = (1, 0,5, 0,1, 0,2)$; $W = (0,4, 0,9, 0,1, 0,2)$ и пусть утверждается, что критерий f_1 важнее, чем f_2 : $f_1 \succ f_2$.

Эти векторные оценки, очевидно, несравнимы по Парето. Рассмотрим оценку $W' = (0,8, 0,5, 0,1, 0,2)$, полученную из W с помощью «переноса» числа 0,4 со второй позиции в первую. Имеем, согласно определению 2, $W' \succ W$, т. к. более важному критерию f_1 в оценке W' соответствует большая оценка (0,8 вместо 0,4). Так как имеем $Z \succ^P W'$ (доминирование по Парето), то естественно считать $Z \succ W' \succ W$ и в результате $Z \succ W$.

Таким образом, оценки Z, W оказываются уже сравнимыми, и оценка W может быть отброшена. Здесь везде предполагается, что рассматриваемые отношения доминирования являются транзитивными.

Методы упорядочения альтернатив, основанные на рассмотренной процедуре «переноса» (*transfer*) с учетом ординальной информации пользователя, будем называть *методами t -упорядочения*.

Рассмотрим укрупненную принципиальную схему алгоритма, реализующего метод t -упорядочения.

В качестве исходной информации для алгоритма t -упорядочения принимается множество S высказываний пользователя (ЛПР) об относительной важности частных критериев вида $S = \{f_i \sim f_j; \dots; f_q \succ f_p\}$.

Будем предполагать, что множество S скорректировано следующим образом. Во-первых, необходимо проверить и при необходимости обеспечить непротиворечивость высказываний из S , может быть, с помощью проведения дополнительного диалога с пользователем для уточнения его системы предпочтений. Во-вторых, необходимо расширить множество S за счет добавления новых высказываний, являющихся транзитивными следствиями уже имеющихся (выполнить операцию транзитивного замыкания). Именно, если мы, например, уже ввели два высказывания $f_i \succ f_j$; $f_j \succ f_k$, то естественно ввести новое высказывание $f_i \succ f_k$ и т. п.

Пусть теперь $Z = (z_1, \dots, z_m)$; $W = (w_1, \dots, w_m)$ – две векторные оценки, которые необходимо сравнить с учетом дополнительной скорректированной информации S .

Если эти оценки сравнимы по Парето, то задача решена. В противном случае вектор Z фиксируется, а по вектору W формируются следующие два множества (может быть, бесконечные, даже если исходные множества оценок конечны).

1. WE – множество W -эквивалентных векторов (включающее сам вектор W), полученное из W с помощью всех возможных переносов δ между парами равноценных критериев. Следовательно, множество WE строится с учетом всех данных типа $f_i = f_j$ из S .

2. WI – множество W -улучшенных векторов, каждый из которых получен с помощью возможных переносов δ с учетом всех данных $f_i \succ f_j$, $f_q \succ f_p$.

Предполагается, что переносы согласно информации $f_q \succ f_p$ производятся только с целью улучшения вновь полученного вектора и, по крайней мере, одна такая улучшающая передача выполнена для любого вектора из WI .

Замечание. В действительности, при программной реализации алгоритма в явном построении указанных множеств нет необходимости.

Далее новое отношение предпочтения $\succ^t$ строится следующим образом:

$$Z \succ^t W \leftrightarrow \left[\exists W' \in WE : Z \succ^P W' \right] \vee \left[\exists W'' \in WI : Z \succ^P W'' \right]. \quad (6)$$

Здесь через $\left(\begin{smallmatrix} P \\ \succ \\ \sim \end{smallmatrix} \right)$ обозначено нестрогое предпочтение вида

$$Z \overset{P}{\succ} W \leftrightarrow \forall i \in [1:m] : z_i \geq w_i.$$

Определение (6) имеет простой смысл. Если вектор Z строго лучше, чем некоторый вектор W' , эквивалентный W , или нестрогое лучше, чем некоторый вектор W'' , который, в свою очередь, строго лучше, чем W , то полагаем, что Z строго лучше W .

Частным случаем изложенного метода t -упорядочения является метод, предложенный В.В. Подиновским (далее – метод П-упорядочения) [1], основанный на том, что мы имеем возможность формировать множества, аналогичные WE и WI с помощью перестановок численных значений оценок между равноценными и неравноценными критериями. Например, пусть дана векторная оценка $Z = (5, 10, 6)$ и из-

вестно, что $f_1 \succ f_2$. Тогда по Подиновскому оценка $Z' = (10, 5, 6)$, полученная из Z перестановкой чисел 5, 10, будет признана лучшей, чем Z , т. к. на место более «важного» критерия f_1 пришло большее значение (10 вместо 5). Если бы критерии f_1 и f_2 были равноценными, то оценки Z, Z' считались бы эквивалентными.

Очевидно, в методе П-упорядочения множества WE, WI оказываются конечными и могут быть практически построены без особых вычислительных проблем.

Недостатком метода П-упорядочения является его недостаточная «мощность». Например, пусть ставится задача сравнения двух векторных оценок $W = (7, 9, 6), Z = (5, 10, 6)$ при наличии ординальной информации $f_1 \succ f_2$. Эти оценки, очевидно, несравнимы по Парето. Несравнимы

они и по методу П-упорядочения (никакие перестановки численных значений оценок между f_1, f_2 не приводят к их сравнимости по Парето). В то же время легко видеть, что согласно методу t -упорядочения для $Z' = (6, 9, 6)$, полученной из Z с помощью переноса $\delta = 1$ со второй позиции в первую, мы имеем $Z' \succ Z, W \succ Z' \succ Z$ и, следовательно, $W \succ Z$.

С позиций «физического смысла» метод t -упорядочения представляется столь же естественным, что и метод П-упорядочения.

Создан метод, позволяющий на основе ординальной информации пользователя строить процедуры сокращения множества Парето многокритериальной задачи. Для непустого множества задач метод оказывается более эффективным, чем известный метод П-упорядочения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подиновский, В.В. Многокритериальные задачи с упорядоченными по важности критериями

[Текст] / В.В. Подиновский // А и Т. –1976. –№ 11. –С. 118–127.

УДК 519.2

Г.И. Белявский, Н.Д. Никоненко

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА БЕЗАРБИТРАЖНОЙ ЦЕНЫ ФИНАНСОВОГО ОБЯЗАТЕЛЬСТВА НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ЛЕВИ

Решается задача вычисления условного математического ожидания:

$$V(t, S) = E(f(S_T) / S_t = S), \quad (1)$$

где f – ограниченная функция, интегрирование проводится по мартингальной мере, S_t – экспоненциальный процесс Леви. Заметим, что задача (1) решается при условии, что мера мартингальная. Если исходная мера не является мартингальной, то возникает задача о переходе к эквивалентной мартингальной мере. Для конструирования эквивалентной мартингальной меры рассматриваются преобразования Гирсанова и Эшера [3]. Для приближенного решения данной задачи используется прием, который далее будет называться «Дискретизация по состоянию процесса Леви».

В статье рассматривается вопрос о переходе

к эквивалентной мартингальной мере, если исходная мера не является мартингальной. Задачу вычисления условного математического ожидания можно рассматривать как задачу определения безарбитражной цены хеджирования дисконтированного финансового обязательства $f(S_T)$ в момент времени t при условии, что в этот момент времени $S_t = S$. При этом процесс S_t – дисконтированная цена рискованного актива на финансовом рынке. Для вычисления условного математического ожидания применяются различные вычислительные методы: факторизации Винера–Хопфа, Галеркина, Монте-Карло, преобразования Фурье, мультиномиальных деревьев, конечных элементов, аналитический метод линий; конечно-разностные схемы [2, 4, 6].

Предлагаемый вычислительный алгоритм от-

личается от известных вычислительных способов решения этой задачи тем, что в рассматриваемом методе приближается не столько сам процесс, сколько условное распределение случайной величины S_T .

Дискретизация процесса Леви по состоянию

Будем использовать следующие факты. Согласно формуле Леви–Хинчина [1, 7] характеристическая функция процесса Леви

$$\Phi_t(\theta) = Ee^{i\theta X_t} = \exp \left\{ t \left(i\theta - \frac{\sigma^2 \theta^2}{2} + \int_{-\infty}^{+\infty} (e^{i\theta x} - 1 - i\theta x I_{\{|x| \leq 1\}}) \nu(dx) \right) \right\}, \quad (2)$$

$\nu(dx)$ – мера Леви: $\nu(\{0\}) = 0$, $\int_{-\infty}^{+\infty} (|x|^2 \wedge 1) \nu(dx) < \infty$.

Кумулянтной называют комплекснозначную функцию:

$$\Psi(\theta) = i\theta - \frac{\sigma^2 \theta^2}{2} + \int_{-\infty}^{+\infty} (e^{i\theta x} - 1 - i\theta x I_{\{|x| \leq 1\}}) \nu(dx). \quad (3)$$

В силу свойств процесса Леви задачу (1) можно рассматривать как задачу вычисления:

$$V(t, S) = Ef(Se^{X_{T-t}}). \quad (4)$$

Характеристическая функция X_{T-t} имеет вид $Ee^{i\theta X_{T-t}} = \exp\{(T-t)\Psi(\theta)\}$. Рассмотрим

$\int_{-\infty}^{+\infty} (e^{i\theta x} - 1 - i\theta x I_{\{|x| \leq 1\}}) \nu(dx)$. Представим интеграл

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{+\infty} (e^{i\theta x} - 1 - i\theta x I_{\{|x| \leq 1\}}) \nu(dx) = \\ &= \int_{[-\varepsilon, \varepsilon]} (e^{i\theta x} - 1 - i\theta x I_{\{|x| \leq 1\}}) \nu(dx) + \\ &+ \int_{[-\varepsilon, \varepsilon]^c} (e^{i\theta x} - 1 - i\theta x I_{\{|x| \leq 1\}}) \nu(dx). \end{aligned}$$

$$\text{Обозначим } I_1 = \int_{[-\varepsilon, \varepsilon]} (e^{i\theta x} - 1 - i\theta x I_{\{|x| \leq 1\}}) \nu(dx).$$

Использование формулы Тейлора приводит к приближенному равенству:

$$I_1 \approx - \int_{[-\varepsilon, \varepsilon]} \frac{(\theta x)^2}{2} \nu(dx) = - \frac{(\overline{\sigma})^2}{2} \theta^2.$$

Второй интеграл $I_2 = \int_{[-\varepsilon, \varepsilon]^c} (e^{i\theta x} - 1) \nu(dx) - i\theta \int_{[-\varepsilon, \varepsilon]^c \cap [-1, 1]} x \nu(dx)$.

Пусть $\int_{[-\varepsilon, \varepsilon]^c \cap [-1, 1]} x \nu(dx) = \hat{m}$.

$$\text{Рассмотрим } \int_{[-\varepsilon, \varepsilon]^c} (e^{i\theta x} - 1) \nu(dx) = \int_{-\infty}^{\infty} (e^{i\theta x} - 1) \nu_{\varepsilon}(dx),$$

где $\nu_{\varepsilon}(dx) = \nu(dx) I_{|x| > \varepsilon}(x)$.

Мера $\nu_{\varepsilon}(dx)$ является конечной, поэтому

$$\int_{-\infty}^{\infty} (e^{i\theta x} - 1) \nu_{\varepsilon}(dx) \text{ сходится абсолютно.}$$

Рассмотрим приближенное равенство

$$\int_{-\infty}^{\infty} (e^{i\theta x} - 1) \nu_{\varepsilon}(dx) \approx \int_B^A (e^{i\theta x} - 1) \nu_{\varepsilon}(dx). \quad \text{Параме-}$$

тры A, B определяются с помощью оценки

$$2 \int_B^A \nu_{\varepsilon}(dx) + 2 \int_A^{\infty} \nu_{\varepsilon}(dx) \leq \gamma, \text{ где } \gamma - \text{ заданная точ-}$$

ность. Наносим сетку на отрезок $[B, A]$, $B = a_0 < a_1 < \dots < a_{N^{T-t}} = A$. При этом будем использовать

элементарные интервалы разной длины и такие, что $\lambda = \int_{a_{j-1}}^{a_j} \nu_{\varepsilon}(dx) = \text{const}$. Рассмотрим приближен-

ное равенство:

$$\int_B^A (e^{i\theta x} - 1) \nu_{\varepsilon}(dx) \approx \sum_{j=1}^{N^{T-t}} (e^{i\theta a_{j-1}} - 1) \lambda, \quad (5)$$

где $\lambda = \int_{a_{j-1}}^{a_j} \nu_{\varepsilon}(dx)$.

Заметим, что выражение в (5) $(e^{i\theta a_{j-1}} - 1) \lambda$ – кумулянта случайной величины $a_{j-1} \xi_j$, где ξ_j – случайная величина, распределенная по закону Пуассона с интенсивностью λ ($\xi_j \in \Pi(\lambda)$).

Выберем λ , для этого рассмотрим неравенство:

$$\begin{aligned} & \left| \int_B^A (e^{i\theta x} - 1) \nu_{\varepsilon}(dx) - \sum_{j=1}^{N^{T-t}} (e^{i\theta a_{j-1}} - 1) \lambda \right| \leq \\ & \leq \sum_{j=1}^{N^{T-t}} \left| \int_{a_{j-1}}^{a_j} (e^{i\theta x} - e^{i\theta a_{j-1}}) \nu_{\varepsilon}(dx) \right|. \end{aligned}$$

При достаточно малой величине разбиения

$$\begin{aligned} & \left| e^{i\theta a_{j-1}} \int_{a_{j-1}}^{a_j} (e^{i\theta(x-a_{j-1})} - 1) \nu_{\varepsilon}(dx) \right| \approx \\ & \approx \left| \int_{a_{j-1}}^{a_j} (i\theta(x-a_{j-1})) \nu_{\varepsilon}(dx) \right| = \lambda |\theta| |a_j - a_{j-1}| \text{ и} \end{aligned}$$

$$\left| \int_B^A (e^{i\theta x} - 1) \nu_{\varepsilon}(dx) - \sum_{j=1}^{N^{T-t}} (e^{i\theta a_{j-1}} - 1) \lambda \right| \leq$$

$$\leq \lambda \sum_{j=1}^{N^{T-t}} |\theta| (a_j - a_{j-1}) = \lambda |\theta| (B - A) \leq \gamma |\theta|.$$

Отсюда

$$\lambda \leq \frac{\gamma}{B-A}. \quad (6)$$

Выбрав λ , можно определить a_k с помощью рекуррентных уравнений:

$$a_0 = B, \int_{a_{j-1}}^{a_j} v_\varepsilon(dx) = \lambda. \quad (7)$$

Рассмотрим случайную величину $H_{N^{T-t}}$ с кумулянтной $\Psi_H(\theta) = \exp\left(i\theta\mu - \frac{\theta^2(\bar{\sigma})^2}{2} + \sum_{k=1}^{N^{T-t}} (e^{i\theta a_{k-1}} - 1)\lambda\right)$, где $\mu = m + \hat{m}$, $\bar{\sigma} = \sqrt{\sigma^2 + \bar{\sigma}^2}$, и характеристической функцией $\Phi_H(\theta) = e^{(T-t)\Psi_H(\theta)}$.

Из предыдущих рассуждений следует приближенное равенство

$$V(t, S) \approx Ef(Se^{H_{N^{T-t}}}). \quad (8)$$

Для вычисления математического ожидания в (8) представляем

$$H_{N^{T-t}} = \sum_{k=1}^{N^{T-t}} (\mu_k + v_k \delta_k + a_{k-1} \xi_k),$$

где $\sum_{k=1}^{N^{T-t}} \mu_k = (T-t)\mu$, $\sum_{k=1}^{N^{T-t}} v_k^2 = (T-t)(\bar{\sigma})^2$, $\xi_k \in \Pi((T-t)\lambda)$ – независимые случайные величины, $\delta_k \in N(0,1)$ – независимые случайные величины, независимые также от ξ_k . В частности, если положить $\mu_k = m_{T-t}$, $v_k = \sigma_{T-t}$, то $m_{T-t} = \frac{(T-t)\mu}{N^{T-t}}$, $\sigma_{T-t} = \left(\bar{\sigma} \sqrt{\frac{T-t}{N^{T-t}}}\right)$.

Введем обозначение $h_k = \mu_k + v_k \delta_k + a_{k-1} \xi_k$. В результате получим дискретный процесс:

$$S_k = S_{k-1} e^{h_k}, S_0 = S, k = 1, 2, \dots, N^{T-t}. \quad (9)$$

Рассмотрим естественную фильтрацию:

$$F_0 = \sigma\{\Omega\}, F_k = \sigma\{h_1, \dots, h_k\}. \quad (10)$$

Относительно фильтрации процесс S_k является адаптированным. Простое вычисление показывает, что условием мартингалности служит равенство:

$$\mu_k = \frac{v_k^2}{2} + \lambda(T-t)(e^{a_{k-1}} - 1), \quad (11)$$

из которого непосредственно следует, что

$$\mu = \frac{(\bar{\sigma})^2}{2} + \lambda \sum_{k=1}^{N^{T-t}} (e^{a_{k-1}} - 1). \quad (12)$$

Нетрудно установить, что равенство (12) является необходимым и достаточным условием мартингалности дискретного процесса S_k . Если условие (12) не выполняется, то возникает необ-

ходимость замены меры на эквивалентную мартингальную меру.

Преобразование Гирсанова и Эшера

Заметим, что один из распространенных способов построения мартингальных мер основан на теореме Гирсанова и ее обобщениях. Другим методом является метод, основанный на преобразовании Эшера. Рассмотрим преобразования Эшера и Гирсанова для дискретных моделей (9).

Преобразование Гирсанова определяется по следующей схеме. Будем искать процесс плотности в виде $Z_k = Z_{k-1} e^{\alpha_k + \beta_k h_k}$, $Z_0 = 1$, $k = 1, 2, \dots, N^{T-t}$.

Параметры α_k, β_k определяются из системы:

$$\begin{cases} E_P e^{(\beta_k + 1)h_k} = e^{-\alpha_k} \\ E_P e^{\beta_k h_k} = e^{-\alpha_k} \end{cases} \quad (13)$$

Процесс плотности можно записать, используя и преобразование Эшера:

$$Z_k = Z_{k-1} \frac{e^{\beta_k h_k}}{E_P e^{\beta_k h_k}}. \quad (14)$$

Из второго уравнения системы (13) $E_P e^{\beta_k h_k} = e^{-\alpha_k}$. Отсюда следует, что преобразования Гирсанова и Эшера совпадают. Для параметра β_k должно выполняться соотношение $E_P e^{(\beta_k + 1)h_k} = E_P e^{\beta_k h_k}$. Характеристическая функция случайной величины h_k – $\Phi_{h_k}(\theta) = \exp\left(i\theta\mu_k - \frac{v_k^2\theta^2}{2} + \lambda(T-t)(e^{i\theta a_{k-1}} - 1)\right)$.

Отсюда уравнение для параметра β_k имеет вид

$$e^{a_{k-1}\beta_k} = P\beta_k + Q, \quad (15)$$

где

$$P = -\frac{v_k^2}{\lambda(T-t)(e^{a_{k-1}} - 1)}, Q = -\frac{v_k^2 + 2\mu_k}{2\lambda(T-t)(e^{a_{k-1}} - 1)}.$$

Поскольку $a_{k-1}P < 0$, то решение (15) существует, и при этом – единственное.

Алгоритм решения задачи

После дискретизации задача (4) трансформируется в задачу вычисления $E(Z_{N^{T-t}} f(S_{N^{T-t}}))$. Если исходная мера мартингальная, то процесс плотности $Z_k = 1$. Предлагаемый вычислительный алгоритм основан на динамическом программировании или телескопическом свойстве математического ожидания.

Рассмотрим последовательность

$$\begin{aligned} W_k(S_k) &= E_P \left(\frac{Z_{k+1} W_{k+1}(S_{k+1})}{Z_k} / F_k \right) = \\ &= \frac{1}{E_P e^{\beta_{k+1} h_{k+1}}} E_P (e^{\beta_{k+1} h_{k+1}} W_{k+1}(S_{k+1}) / F_k), \\ W_{N^{T-t}}(S_{N^{T-t}}) &= f(S_{N^{T-t}}). \end{aligned}$$

Отсюда

$$\begin{aligned} W_k(S_k) &= Q_k \sum_{y=0}^{\infty} \left(\int_{-\infty}^{\infty} \exp(\beta_{k+1}(\mu_{k+1} + v_{k+1}x + a_k y)) \times \right. \\ &\times W_{k+1}(S_k \exp(\mu_{k+1} + v_{k+1}x + a_k y)) e^{-\frac{x^2}{2}} dx \Big) \times \\ &\times \frac{\lambda^y (T-t)^y}{y!}, \end{aligned} \quad (16)$$

где

$$Q_k = \frac{1}{\exp \left(\beta_{k+1} \mu_{k+1} + \frac{v_{k+1}^2}{2} \beta_{k+1}^2 + \lambda(T-t) e^{a_k \beta_{k+1}} \right) \sqrt{2\pi}}.$$

В результате безарбитражная текущая цена финансового обязательства

$$V(t, S) = W_0(S) \quad (17)$$

может быть вычислена с использованием рекуррентных формул (16).

В статье предложен алгоритм вычисления безарбитражной текущей цены финансового обязательства, использующий идею замены процесса Леви дискретным процессом с применением процедуры дискретизации процесса Леви по состоянию. В результате получен рекуррентный алгоритм, в котором на каждом шаге математическое ожидание вычисляется по пуассоновским и нормальным случайным величинам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bertoin, J.** Levy Processes [Текст] / J. Bertoin. —Cambridge University Press: Cambridge, 1996.
2. **Carr, P.** Option valuation using the fast Fourier transform [Text] / P. Carr, D. Madan // J. Comput. Finance. —1998. —Vol. 2. —P. 61–73.
3. **Jacod, J.** Limit Theorems for Stochastic Processes [Text] / J. Jacod, A.N. Shiryaev. —Berlin: Springer, 2002.
4. **Zhu, J.** Modular Pricing of Options: An Application of Fourier Analysis [Text] / J. Zhu. —Berlin: Springer, 2000.
5. **Галиц, Л.** Финансовая инженерия: инструменты и способы управления финансовым риском [Текст] / Л. Галиц. —М.: ТВП, 1998.
6. **Кудрявцев, О.Е.** Вычисление цен барьерных и американских опционов в моделях Леви [Текст] / О.Е. Кудрявцев // Обзорные прикладной и промышленной математики. —2010. —Т. 17. —Вып. 2. —С. 210–220.
7. **Ширяев, А.Н.** Основы стохастической финансовой математики: Т. 1. Факты. Модели [Текст] / А.Н. Ширяев. —М.: ФАЗИС, 1998.

УДК 530.14

В.Д. Мазин

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ВЕЛИЧИНЫ В ПСЕВДОВЕКЛИДОВОЙ ПЛОСКОСТИ

Пути развития теоретической метрологии, указанные в [1], среди которых особо следует отметить построение и обоснование математических моделей, не утратили сегодня актуальность.

Среди подходов к основополагающим категориям измерений особое место занимает геометрический. В «Математической энциклопедии» [2] следующим образом охарактеризована роль геометрии: «Развитие геометрии, ее приложения,

развитие геометрического восприятия абстрактных объектов в различных областях математики и естествознания свидетельствуют о важности геометрии как одного из самых глубоких и плодотворных по идеям и методам средств познания действительности». В [3] подчеркивается огромное эвристическое значение геометрического представления понятий анализа и отмечается, что геометрия «становится все более и более важной

в ...физике, упрощая математический формализм и углубляя физическое понимание. Это возрождение геометрии оказало влияние не только на специальную и общую теории относительности, очевидно геометрические по своей сути, но и на другие разделы физики, где на авансцену выходит уже не геометрия физического пространства, а геометрия более абстрактных пространств».

В настоящей статье предлагается геометрическое представление фундаментального в метрологии понятия физической величины, органически содержащее степень ее неопределенности.

Постановка задачи. Пусть величина x характеризует объект, у которого она может изменяться от x_a до x_b . Именно такая ситуация имеет место на практике, поскольку ни один физический параметр в реальных условиях не может быть задан единственным значением. Ему всегда сопутствует некоторый интервал возможного изменения, происходящего либо при переходе от одного экземпляра данного типа к другому, либо вследствие изменения внешних условий, либо из-за погрешности определения значения. Наконец, существуют объекты, которые в принципе описываются лишь вероятностными категориями, как, например, объекты квантовой механики. Фиксированное значение физической величины есть абстракция, которой мы пользуемся весьма часто, но не тогда, когда информация об интервале неопределенности может повлиять на принятие решения.

Интервал неопределенности и среднее значение являются характеристиками разного свойства (показателями положения на числовой оси и рассеяния вокруг этого положения). С другой стороны, физическая величина содержит качественный и количественный аспекты. И та, и другая двойственность наводит на мысль о необходимости такого представления величины, которое включало бы органически эту двойственность.

Задача данного исследования – попытка представления любой физической величины двумерным вектором некоторого абстрактного пространства.

Физическая величина как вектор, характеризующий ее неопределенность. В [4] доказано следующее предложение: *расширенное в некотором смысле множество логарифмов физических величин вместе с нулем является векторным пространством.* Каждый вектор этого пространства согласно основному уравнению измерений

$x = \{x\}[x]$, где x – физическая величина, $\{x\}$ – ее числовое значение, $[x]$ – ее единица, может быть разложен на две составляющие, образующиеся после логарифмирования уравнения (строго говоря, данное простое выражение уравнением, конечно, не является):

$$\ln x = \ln \{x\} + \ln [x]. \quad (1)$$

Единицу физической величины x в когерентной системе единиц можно представить как

$$[x] = \prod_1^n [x_i]^{\alpha_i},$$

где n – число единиц $[x_i]$ других величин, образующих x согласно определенной физической закономерности (определяющему уравнению), α_i – показатель степени, в которой $[x_i]$ входит в формулу $[x]$. Подставляя в (1), имеем

$$x = \{x\} \prod_1^n [x_i]^{\alpha_i},$$

а после логарифмирования

$$\ln x = \ln \{x\} + \sum_1^n \alpha_i \ln [x_i]. \quad (2)$$

Записи (1) и (2) обычно считаются некорректными, ведущими к противоречиям, поскольку принято, что не имеют смысла трансцендентные функции именованных величин, а единицы величин являются как раз таковыми. В частности, общепринято, что число в физической величине содержится лишь в ее первом множителе $\{x\}$, в то время как второй вводится просто для указания единицы, выражая качественный аспект величины. Следует отметить, что широко используются логарифмические масштабы представления физических величин, однако, при этом фактически логарифмируются числовые значения, а единицы остаются «в уме».

Тем не менее, формальные операции (1) и (2), очевидно, могут быть проведены, и мы покажем, что они не только формальны. Будем различать принципиальную возможность задания координатной системы и методику определения значений координат. Проводя формальное логарифмирование, мы задаем координатную систему. Что же касается значений координат, то здесь возможны различные подходы. Во-первых, следует признать, что, поскольку единица величины может быть различной по размеру, она несет в себе количественное содержание, которое, однако, остается неопределенным, т. к. вся количественная сторона физической величины получается

от ее сравнения с единицей. Но, поскольку оно есть, его можно прологарифмировать. Во-вторых, ниже будет показано, как, используя непреложный факт неопределенности значения величины, можно придать смысл $\ln [x]$. Наконец, мы можем считать $\ln [x_i]$ просто символом координаты, знаком направления, а собственно координатой считать a_i .

Если $\sqrt{x_a x_b} = x_{cp}$, то соответствующие векторы изобразятся так, как показано на рис. 1, где a_0 – ось логарифмов числовых значений. Выберем метрику на данной плоскости таким образом, чтобы она отражала факт нахождения x в заданных пределах. Это можно сделать, потребовав, чтобы длины векторов из области определения были вещественными, а за пределами этой области – мнимыми. Соответственно получается $|\ln x_a| = |\ln x_b| = 0$, т. е. соответствующие векторы оказываются изотропными. Мнимые длины имеют все векторы, располагающиеся слева и справа от изотропных, включая направленные по числовой оси. Последнее соответствует нашему условию, смысл которого ясен: то, что не соответствует действительности, является мнимым. Поскольку абстрактных чисел в природе нет, числовая ось должна быть мнимой. Такая метрика является псевдоевклидовой, т. е.

$$|\ln x| = \sqrt{|\ln x_{cp}|^2 - (a_{0x} - a_{cp})^2}.$$

Но тогда

$$|\ln x_{cp}| = a_b - a_{cp} = a_{cp} - a_a, \quad (4)$$

$$|\ln [x]| = \sqrt{|\ln x_{cp}|^2 - a_{cp}^2}. \quad (5)$$

Подставляя (4) в (5) и учитывая, что

$$a_{cp} = \frac{a_a + a_b}{2}, \quad (6)$$

получаем:

$$|\ln [x]| = \sqrt{-a_a a_b}. \quad (7)$$

Этот результат имеет принципиальное значение. Он показывает, что норма вектора, представляющего единицу величины, не является раз и навсегда заданной, а представляет среднее геометрическое логарифмов предельных значений данной величины. После несложных преобразований имеем также

$$|\ln x| = \sqrt{(a_b - a_{0x})(a_{0x} - a_a)}. \quad (8)$$

В результате данного представления появля-

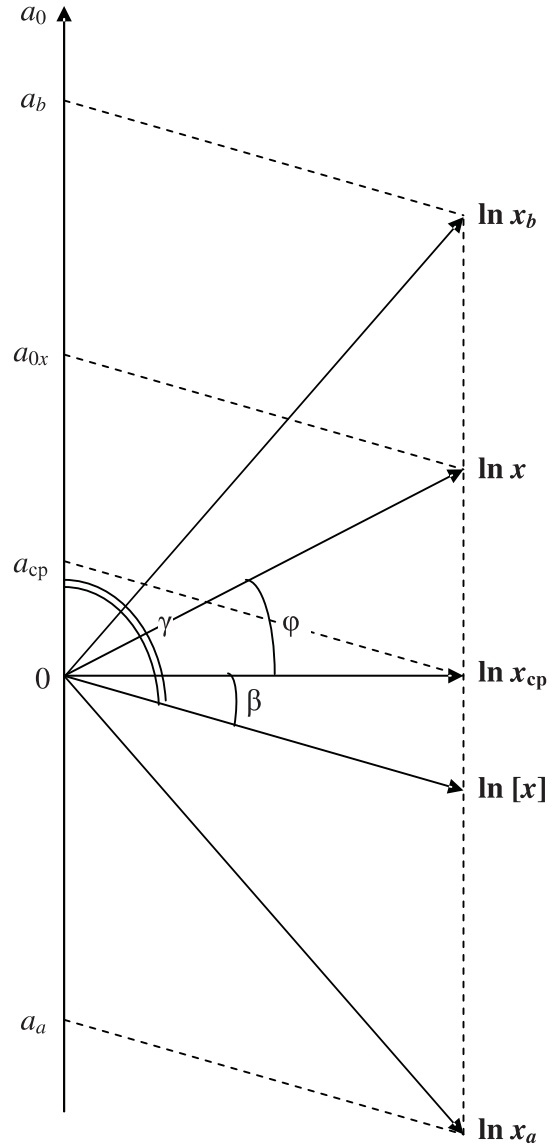


Рис. 1. Векторное представление физической величины

ются четыре новых сущности. Первая из них *норма вектора $\ln [x]$* .

Вектор единицы. Норма вектора единицы в общем не равна нулю, т. к. представляет не обычный «логарифм единицы», а логарифм как бы определенного качественного содержания величины, что находится в полном соответствии с тем, что числовое значение и единица выражают соответственно ее количественный и качественный аспекты. Нас не должно смущать то обстоятельство, что логарифмируется «качество»: как видно, для него может быть найдена надлежащая количественная мера – $\exp \sqrt{-a_a a_b}$. Тем самым приобретает возможность последовательной

математизации множества физических величин.

Будучи выражена вектором псевдоевклидовой плоскости, единица величины обладает, таким образом, двумя измерениями. Одно из них, обычное, с логарифмической координатой нуль, характеризует размер единицы-эталона. Другое также дает размер единицы, но системной, предоставляемой самим диапазоном x_a, x_b .

Полный вектор величины. Другая новая сущность, возникающая в связи с геометрическим представлением величины, – *длина ее полного вектора* $|\ln x|$. Как следует из (8), при $a_{0x} = a_a$, либо $a_{0x} = a_b$ $|\ln x| = 0$. Это имеет объяснение только при условии, что a_{0x} представляет центр соответствующего вероятностного распределения. В этом случае если центр распределения совпадает с его границей, дисперсия оказывается равной нулю (поскольку нет значений по одну сторону от центра, их нет и по другую), а данное значение – константой. Никакое другое толкование не в состоянии объяснить исключительности с информационной позиции предельных значений a_{0x} . Более того, мы можем определить и разновидность центра распределения величины, представляемую координатой a_{0x} в данной модели. Поскольку числовая ось – «одна на всех», т. е. вдоль нее откладываются значения центров распределения всех характеризующих объект величин, эти центры при векторном сложении величин должны суммироваться алгебраически. Но такому правилу сложения удовлетворяют математические ожидания. Следовательно, a_{0x} есть математическое ожидание логарифмов величины x . Следует заметить, что в каждой отдельной псевдоевклидовой плоскости, характеризующей определенную величину, в качестве координаты a_{0x} может выступать любая из известных характеристик центра вероятностного распределения. При этом если величины перемножаются (или, что то же самое, векторно складываются их логарифмы), должно быть определено правило сложения центров их логарифмических вероятностных распределений. Видимо, это потребует установления разных числовых осей для разных величин. Однако этого вопроса мы здесь касаться не будем.

Заметим, что причина двумерности данного представления физической величины – в принципиальной неопределенности ее значения, ввиду которой средние a_{0x} и $|\ln [x]|$ оказываются по модулю различными.

В целом длина вектора величины выражает степень ее неопределенности в виде среднего геометрического из двух максимально возможных отклонений логарифмов значений величины от их центра распределения.

Перепишем (8) в виде

$$|\ln x| = \sqrt{\ln \frac{\{x_b\}}{\{x\}} \cdot \ln \frac{\{x\}}{\{x_a\}}} = \sqrt{\ln \frac{x_b}{x} \cdot \ln \frac{x}{x_a}},$$

где $x = \exp a_{0x}$. Если изменение величины в пределах $x_a - x_b$ достаточно мало (например, вызвано погрешностью), отношения $\frac{x_b}{x}$ и $\frac{x}{x_a}$ близки к единице. Тогда, разлагая логарифмы в ряд Тейлора и ограничиваясь двумя первыми членами разложения, получим:

$$|\ln x| \cong \sqrt{\left(\frac{x_b}{x} - 1\right)\left(\frac{x}{x_a} - 1\right)} = \sqrt{-\gamma_+ \gamma_-},$$

где γ_+ и γ_- – соответственно положительная и отрицательная оценки погрешности. Чаще всего $\gamma_+ = \gamma_- = \gamma$ [5], и тогда

$$|\ln x| \equiv \gamma.$$

Границы изменения величины x_a и x_b можно понимать как доверительные, указываемые с определенной вероятностью. Тем самым и вся модель в виде псевдоевклидовой плоскости оказывается вероятностной. При этом приведенное выше толкование смысла a_{0x} теряет в строгости на вероятность $P\{x < x_a\}$ или соответственно $P\{x > x_b\}$.

Угловая характеристика измеримого свойства физического объекта. Третьей сущностью, нуждающейся в осмыслении, оказывается псевдоевклидов *угол между вектором единицы и полным вектором величины*. Рассмотрим рис. 2. Каждая точка на прямой, совпадающей по направлению с вектором величины x , в т. ч. и такая, которая, соответствует нецелой степени, выражает одно и то же свойство объекта как в качественном, так

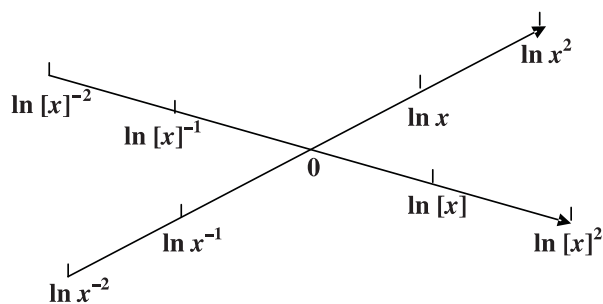


Рис. 2. К расширению понятия физической величины

и в количественном отношении. Так, например, электрическое сопротивление, его квадрат, проводимость и т. п. выражают одно и то же свойство проводника, хоть и различным образом. Но тогда вектор $\ln x$, так же, как и любой, ему коллинеарный, например $\ln x^2$, характеризует лишь одно из сечений этого общего свойства. В таком случае должна существовать характеристика, объединяющая все эти сечения. Такой характеристикой, очевидно, является угол, под которым прямая u пересекает некоторое заданное направление, например, направление вектора единицы, изображенное на рис. 2. Угол между этими прямыми является так же, как и величина x , характеристикой объекта в принятой системе единиц, однако более общей и более устойчивой. Речь идет, конечно, не об угле, видимом в изображении, а о псевдоевклидовом угле. Таким образом, мы вынуждены обратиться к углу как к характеристике измеримого свойства физического объекта.

Для упрощения записей обозначим: $\ln x = x^*$; $\ln [x] = [x]^*$; $|x_{cp}^*| = l_{cp}$; $\frac{[x]^*}{|e|} = a_x$, где e – единичный вектор, направленный вдоль $[x]^*$.

Определим вначале угол θ_β между векторами единицы и среднего геометрического. Между этим углом и его видимым изображением β (см. рис. 1) существует соотношение [6]:

$$\theta_\beta = \frac{1}{2} \ln \frac{1 + \operatorname{tg} \beta}{1 - \operatorname{tg} \beta}. \quad (9)$$

Но $\operatorname{tg} \beta = a_{cp}/l_{cp}$, откуда, подставляя (6) и (4), получаем:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{a_a + a_b}{2(a_b - a_{cp})} = \frac{a_a + a_b}{a_b - a_a}.$$

Отсюда, подставляя в (9), находим:

$$\theta_\beta = \frac{1}{2} \ln \left(-\frac{a_b}{a_a} \right), \quad (10)$$

т. е. псевдоевклидов угол между векторами единицы и среднего геометрического для данного объекта определяется отношением логарифмов предельных значений величины.

Формула (10) устанавливает степень различия между $[x]^*$ и l_{cp} и показательна в том смысле, что x_{cp} тоже может считаться системной единицей. Если $[x]$ по своему размеру находится вне диапазона изменения величины, a_a и a_b оказываются одного знака, и, как следует из (7), под знаком логарифма оказывается отрицательное число. Такая ситуация отражает факт нахождения внутри угла

θ_β одного из изотропных направлений x_a и x_b , а такие углы на псевдоевклидовой плоскости не измеряются. При этом, как уже отмечалось, длина вектора единицы оказывается мнимой. Соотнести l_{cp} и $[x]^*$ в этом случае можно лишь, введя посредством масштабного преобразования $[x]^*$ в область между x_a^* и x_b^* , либо выведя посредством обратного масштабного преобразования l_{cp} из этой области. При $a_a = 0$, либо $a_b = 0$ θ_β становится бесконечным, как и положено псевдоевклидову углу, одна сторона которого имеет изотропное направление (в этом случае $[x] = x_a$ или $[x] = x_b$).

Теперь определим угол θ_ϕ между векторами среднего геометрического и полным вектором величины x , которому в изображении соответствует угол ϕ . Как явствует из рис. 1,

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{a_{0x} - a_{cp}}{l_{cp}} = 2 \frac{a_{0x} - (a_a + a_b)/2}{a_b - a_a} = \frac{2a_{0x} - a_a - a_b}{a_b - a_a}.$$

Тогда, используя (10), находим:

$$\theta_\phi = \frac{1}{2} \ln \frac{a_{0x} - a_a}{a_b - a_{0x}}.$$

Под знаком логарифма в данном случае оказывается простое отношение трех точек $-a_a, a_{0x}, a_b$, лежащих на одной прямой, – основной аффинный инвариант.

Наконец, угол между вектором единицы и полным вектором величины

$$\theta = \theta_\beta + \theta_\phi = \frac{1}{2} \ln \left(-\frac{a_b}{a_a} \cdot \frac{a_{0x} - a_a}{a_b - a_{0x}} \right) = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{a_{0x} - a_a}{a_b - a_{0x}} \cdot \frac{0 - a_a}{a_b - 0} \right).$$

Здесь под знаком логарифма стоит уже сложное отношение четырех точек прямой $-a_a, a_b, a_{0x}, 0$, представляющее главный проективный инвариант. Замечательно, что последняя формула в точности совпадает с формулой, выражающей длину отрезка $0 - a_{0x}$ в гиперболической и эллиптической геометриях. Она аналогична формуле Лагерра:

$$\psi = \frac{i}{2} \ln(j_1 j_2 u_1 u_2),$$

где ψ – евклидов угол в комплексном евклидовом пространстве; u_1 и u_2 – две вещественные прямые; j_1 и j_2 – две изотропные мнимые прямые, причем все четыре прямые проходят через одну точку; $(j_1 j_2 u_1 u_2)$ – сложное отношение указанных четырех прямых. В нашем случае сложное отношение

четырёх точек, очевидно, равно сложному отношению прямых, на которых лежат векторы x_a^* , x_b^* , x^* и $[x]^*$. Из них первые две тоже изотропны. Разница в том, что в формуле Лагерра пара прямых вещественная, а другая пара – мнимая, в нашем же случае все прямые мнимые. Из-за этого множителем в формуле Лагерра служит i вместо единицы.

Физический смысл псевдоевклидовой плоскости. Наконец, требуется выяснение физического смысла *всей псевдоевклидовой плоскости, определяемой векторами единицы и числового значения*. Каждая ее точка А (рис. 3) характеризует величину одного и того же рода в любой степени, меняющуюся в определенных границах. Мы назовем ее *изображающей*. Границы x_a и x_b , а также логарифмический центр распределения a_{0x} в общем меняются от точки к точке. В таком случае смысл их совокупности, образующей псевдоевклидову плоскость, станет ясным, если представить себе возможные причины перехода из одной точки в другую, т. е. движения в этой плоскости. Эти причины математически выражаются параметрами, при изменении которых конец вектора величины описывает некоторые траектории. Можно указать три вида таких параметров: доверительную вероятность, степень величины и внешние факторы. В *первом* случае, поскольку центр распределения (координата a_{0x}) остается постоянным, а a_a и a_b меняются, движение точки А будет происходить вдоль вектора $[x]^*$.

Если параметром является *степень величины*, то a_a , a_b и a_{0x} изменяются пропорционально. В самом деле, для величины x^a $a_0 = \ln x^a = \alpha \cdot \ln x$.

При положительных α a_0 является возрастающей функцией x , и тогда $P_x\{x_a\} = P_{a_0}\{\alpha \cdot \ln x_a\}$.

Но это означает, что $a_a = \alpha \cdot \ln x_a$ и изменяется пропорционально α . При $\alpha < 0$ a_0 является убывающей функцией x , вследствие чего

$$P_x\{x_a\} = P_x\{x > x_a\} = P_{a_0}\{\alpha \cdot \ln x_a\},$$

$a_a = \alpha \cdot \ln x_a$ и также изменяется пропорционально α . Аналогично пропорционально α изменяется также a_b . В качестве центра распределения a_{0x} , как известно, могут использоваться:

- 1) матожидание;
- 2) среднее арифметическое из β -процентной и $(1 - \beta)$ -процентной квантилей (в частности, медиана распределения);
- 3) мода.

В первом случае, поскольку $M\{\alpha \cdot \ln x\} = \alpha \cdot M\{\ln x\}$, a_{0x} пропорционально меняется с α .

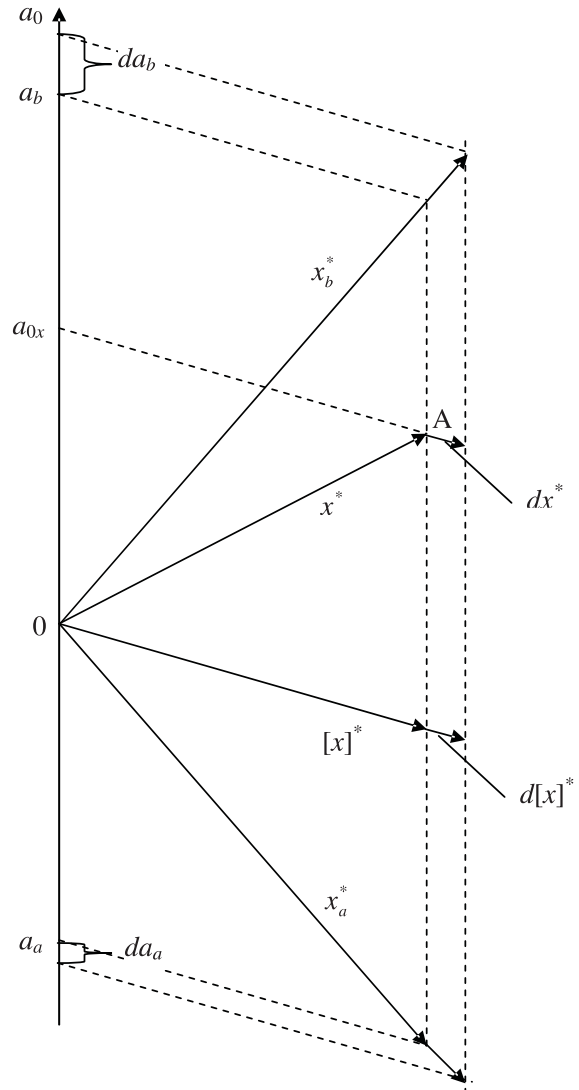


Рис. 3. Движение в плоскости представления физической величины

Это справедливо и во втором случае, поскольку подобно a_a и a_b меняется каждая квантиль. Введем обозначение $\ln x = y$. Тогда, согласно [7], можно написать:

$$p_{a_0}(a_{0x}) = \frac{1}{|\alpha|} p_y\left(\frac{a_{0x}}{\alpha}\right).$$

Если $p_y\left(\frac{a_{0x}}{\alpha}\right) = \max p_y$, то $p_{a_0}(a_{0x}) = \max p_{a_0}$.

Но в этом случае a_{0x} – мода. Это сохраняется при любом α , в то время как a_{0x} меняется пропорционально ему. Следовательно, и третий вид центра распределения изменяется пропорционально α . Таким образом, при изменении степени величины пропорционально изменяются обе координаты, a_{0x} и a_x . Точка А будет двигаться вдоль вектора x^* .



Как отмечалось выше, различные степени величины представляют различные сечения измеримого свойства физического объекта, в частности, выражаемого величиной. В связи с этим проведем интересную на наш взгляд аналогию. Запишем выражение ряда Фурье:

$$x(t) = \frac{1}{2} \sum_{-\infty}^{\infty} \dot{A}_k \exp(jk\omega_i t),$$

откуда при $k_{\max} = n$ имеем

$$\begin{aligned} x(t) &= \frac{1}{2} \sum_{-n}^n \dot{A}_k \exp(jk\omega_i t) = \\ &= \frac{1}{2} \sum_{-n}^n A_k \exp(j\varphi_k) \exp(jk\omega_i t). \end{aligned} \quad (11)$$

Теперь запишем функцию связи двух величин в виде степенного многочлена:

$$\begin{aligned} y(x) &= \sum_0^n A_k x^k = \sum_0^n A_k \exp(k \cdot \ln x) = \\ &= \sum_0^n A_k \exp(k \cdot \ln[x]) \exp(k \cdot \ln\{x\}). \end{aligned} \quad (12)$$

Ряд Фурье представляет спектр. На основании похожести выражений (11) и (12) мы можем говорить о степенном многочлене как о спектре с той разницей, что спектральные составляющие являются не гармоническими, а степенными. При этом роль начальной фазы играет $[x]^k$, роль текущей фазы – текущее значение x . Такой подход тесно увязывается с сущностью, описываемой псевдоевклидовой плоскостью, которая и оказывается на входе измерительного прибора, когда речь идет об измерении какой-либо величины. Прибор подобно фильтру выбирает характеризующие данную сущность величины, что отражается в характере его шкалы $y = f(x)$.

Наконец, параметрами, определяющими положение изображающей точки, могут быть *внешние факторы*, под которыми мы будем понимать не только влияющие факторы в обычной трактовке, но и координаты места и времени, при которых величина имеет доверительные границы x_a и x_b . Такая координата, в частности, может иметь смысл параметра процесса (время) или поля (пространственная координата), в котором x характеризует одно из сечений. Если процесс случаен и стационарен, движение точки A будет происходить вдоль вектора $[x]^*$.

Подведем итог. Представление физической величины вектором псевдоевклидовой плоскости означает указание наряду с центром ее вероят-

ностного распределения степени ее неопределенности. Последняя органически входит в описание физической величины и может нести в зависимости от ситуации как апостериорный (погрешность), так и априорный (возможные границы изменения) смысл. Возможность органического и необходимого по сути сочетания центра распределения величины и степени ее неопределенности, по нашему мнению, является доводом в пользу геометрического представления физических величин. Кроме того, предпринятый подход позволяет математически, через псевдоевклидов угол выразить то свойство физического объекта, частным проявлением которого является физическая величина. Тем самым он представляет собой естественное развитие представления величины в виде числовой оси и в целом более полным образом характеризует то же свойство объекта, что и величина. Наконец, вся псевдоевклидова плоскость имеет совершенно определенный физический смысл в зависимости от того, какие параметры вызывают переход из одной точки этой плоскости в другую.

Напрашивается вопрос, каким образом использовать данное представление при описании физических процессов. Иными словами, как применить полученные результаты на практике. Ведь данная статья по самой своей сути не является чистой теоретической.

Что касается неперменного представления величины в виде сочетания центра ее распределения и рассеяния вокруг центра, то на первый взгляд ответ ясен. Поскольку такое сочетание описывается двумерным вектором, то эти векторы и должны занять место привычных физических величин в соответствующих уравнениях. Однако это кажется простым и естественным лишь на первый взгляд. Как трансформируются при этом уравнения (в частности, уравнения математической физики), на данном этапе вовсе не ясно.

Неопределенности (погрешности), естественно, и сегодня учитываются при описании физических процессов. Однако «мухи отдельно, котлеты отдельно» – значения величин и неопределенностей этих значений, как правило, оцениваются раздельно. Оценка неопределенностей может, как известно, производиться по предельным значениям, с использованием среднеквадратических значений (стандартных неопределенностей – классический метод), а также недавно появившимся векторно-аналитическим методом [8].

Последний, кстати, фактически использует данное представление, поскольку в нем осуществляется векторное сложение расширенных неопределенностей. Метод статистического моделирования (называемый также *методом статистических испытаний, методом Монте-Карло*) учитывает автоматически как положение на числовой оси, так и рассеяние значений физической величины, т. к. представляет ее случайной совокупностью, но требует для своей реализации резкого увели-

чения вычислительного ресурса.

На вопрос, что практически дает «угловое» представление свойств физических объектов, также ответить сложно. Здесь причина в радикальном расширении понятия «физическая величина».

В целом представляется, что вопрос о практическом использовании приведенных соображений выходит за рамки данной статьи и нуждается в отдельном рассмотрении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тарбеев, Ю.В.** Пути развития фундаментальных исследований в области теоретической метрологии [Текст] / Ю.В. Тарбеев // III Всесоюз. совещ. по теорет. метрологии: тез. докл. –Л., 1986. –С. 4–7.
2. Математическая энциклопедия: В 5 т. [Текст] / –М., 1977. –Т. 1. –1152 с.
3. **Шутц, Б.** Геометрические методы математической физики [Текст] / Б. Шутц. –М., 1984. –303 с.
4. **Мазин, В.Д.** Описание свойств физических объектов в кусочно-евклидовых и кусочно-римановых пространствах [Текст] / В.Д. Мазин // Вычисл., измер. и управл. системы. –Л.: Изд-во СПбГТУ, 1993.
5. **Новицкий, П.В.** Оценка погрешностей результатов измерений [Текст] / П.В. Новицкий, И.А. Зограф; 2-е изд. перераб. и доп. –Л., 1991. –303 с.
6. **Рашевский, П.К.** Риманова геометрия и тензорный анализ [Текст] / П.К. Рашевский; Изд. 4-е, стер. –М.: УРСС, 2002. –664 с.
7. **Корн, Г.** Справочник по математике для научных работников и инженеров [Текст] / Г. Корн, Т. Корн; 5-е изд. –М., 1984. –831 с.
8. **Mazin, V.** Properties and application technology of a vector-analytical method for an estimation of uncertainty in measurement [Text] / V. Mazin, A. Chepushtanov // Proc. of the 56-th International Scientific Colloquium of the TU Ilmenau. –Ilmenau, 2008.

УДК 681.3.06(075.8)

И.Г. Черноруцкий

ФУНКЦИИ РЕЛАКСАЦИИ ГРАДИЕНТНЫХ МЕТОДОВ

Введено понятие *функции релаксации* (ФР) для класса матричных градиентных методов, включающего в себя такие классические процедуры, как метод простого градиентного спуска, метод Ньютона, метод Маркуардта–Левенберга. Показано, что ФР является своеобразным «паспортом» метода и полностью определяет его локальные свойства подобно областям устойчивости методов численного интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений. ФР является не только средством анализа заданного матричного градиентного метода, но и средством синтеза новых оптимизирующих процедур, обладающих необходимыми свойствами.

Пусть решается задача

$$J(x) \rightarrow \min_x, x \in R^n, J \in C^2(R^n). \quad (1)$$

Рассмотрим класс матричных градиентных методов вида

$$x^{k+1} = x^k - H_k(A_k, h_k)J'(x^k), h_k \in R^1, \quad (2)$$

где $A_k = J''(x^k)$, H_k – матричная функция A_k . Предполагается, что в некоторой ζ_k -окрестности $\{x \in R^n \mid \|x - x^k\| \leq \zeta_k\}$ точки x^k функционал $J(x)$ достаточно точно аппроксимируется квадратичным функционалом

$$f(x) = 1/2 \langle A_k x, x \rangle - \langle b_k, x \rangle + c_k, \quad (3)$$

где A_k – симметричная, не обязательно положительно определенная матрица. Без существенного ограничения общности можно считать, что $b_k = 0$, $c_k = 0$. Действительно, принимая $\det A_k \neq 0$, $x = x^* + z$, где $x^* = A_k^{-1}b_k$, получаем представление

$$f_1(z) = f(x^* + z) = 1/2 \langle A_k z, z \rangle + \bar{c}_k. \quad (4)$$

При этом константа $\bar{c}_k = c_k - 1/2 \langle A_k x^*, x^* \rangle$ может не учитываться, как не влияющая на процесс оптимизации.

Формула (2) обладает свойством инвариантности относительно смещения начала координат. Будучи записанной для $f(x)$, она преобразуется в аналогичное соотношение для $f_1(z)$. Для $f(x)$ имеем:

$$x^{k+1} = x^k - H_k(A_k x^k - b_k). \quad (5)$$

Принимая $z^k = x^k - x^*$, получаем из (5) $z^{k+1} = z^k - H_k A_k z^k$. Это запись метода (2) для функционала f_1 .

Ставится задача построения таких матричных функций H_k , чтобы выполнялись условия релаксационности процесса $f(x^{k+1}) < f(x^k)$.

Определение. Скалярная функция $R_h(\lambda) = 1 - H(\lambda, h)\lambda$; $\lambda, h \in R^1$ называется *функцией релаксации* метода (2), а ее значения $R_h(\lambda_i)$ на спектре матрицы A_k – множителями релаксации для точки x^k .

В некоторых случаях для сокращения записей индекс « h » в выражении функции релаксации будет опускаться.

Здесь $H(\lambda, h)$ означает скалярную зависимость, отвечающую матричной функции $H(A_k, h_k)$ в представлении (2).

Напомним, что если A – симметричная матрица и $A = T \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) T^T$, где T – ортогональная матрица, столбцы которой есть собственные векторы матрицы A , то $F(A) = T \text{diag}[F(\lambda_1), F(\lambda_2), \dots, F(\lambda_n)] T^T$.

Матричная функция имеет смысл, если порождающая скалярная функция $F(\lambda)$ определена в точках $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$.

Теорема. Для выполнения условия

$$f(x^{k+1}) \leq f(x^k) \quad (6)$$

при $\forall x^k \in R^n$ необходимо и достаточно, чтобы

$$|R(\lambda_i)| \geq 1 (\lambda_i < 0); |R(\lambda_i)| \leq 1 (\lambda_i > 0) \quad (7)$$

для всех собственных чисел $\lambda_i, i = \overline{1, n}$ матрицы A_k .

Доказательство. Пусть $\{u_i\}$ – ортонормированный базис, составленный из собственных векторов матрицы A_k . Тогда, разлагая x^k по векторам базиса, получаем:

$$\begin{aligned} x^k &= \sum_{i=1}^n \xi_{i,k} u_i; \quad x^{k+1} = x^k - H_k(A_k, h_k) f'(x_k) = \\ &= (E - H_k A_k) x^k = \sum_{i=1}^n \xi_{i,k} (1 - H_k(\lambda_i, h_k) \lambda_i) u_i = \\ &= \sum_{i=1}^n \xi_{i,k} R(\lambda_i) u_i. \end{aligned}$$

Из сравнения выражений

$$\begin{aligned} f(x^k) &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \xi_{i,k}^2 \lambda_i; \\ f(x^{k+1}) &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \xi_{i,k+1}^2 \lambda_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \xi_{i,k}^2 \lambda_i R^2(\lambda_i) \end{aligned} \quad (8)$$

следует, что при выполнении (7) каждое слагаемое суммы в представлении $f(x^k)$ не возрастает. Достаточность доказана. Докажем необходимость. Пусть существует такой индекс $i = i_0$, для которого $\lambda_{i_0} < 0, |R(\lambda_{i_0})| < 1$. Выберем $x^k = u_{i_0}$. Тогда $f(x^k) = 0,5 \lambda_{i_0} < f(x^{k+1}) = 0,5 \lambda_{i_0} R^2$, что противоречит условию релаксационности (6). Аналогично рассматривается второе неравенство (7). Теорема доказана.

З а м е ч а н и я.

1. Для строгого выполнения неравенства (6) необходимо и достаточно, кроме выполнения условий (7), потребовать, чтобы существовал такой индекс $i = i_0$, для которого $\xi_{i_0,k} \neq 0$, и соответствующее неравенство (7) было строгим.

2. Выражения (8) позволяют оценить скорость убывания функционала f в зависимости от «запаса», с которым выполняются неравенства (7). Действительно, обозначим через λ_i^+, λ_i^- положительные и отрицательные собственные числа матрицы A_k . Эти же индексы присвоим соответствующим собственным векторам. Суммирование по соответствующим i будем обозначать Σ^+, Σ^- . Тогда

$$\begin{aligned} 2[f(x^k) - f(x^{k+1})] &= \Sigma^+ \xi_{i,k}^2 \lambda_i^+ (1 - R^2(\lambda_i^+)) + \\ &+ \Sigma^- \xi_{i,k}^2 |\lambda_i^-| (R^2(\lambda_i^-) - 1). \end{aligned}$$

Из полученного выражения следует, что наибольшее подавление будут испытывать слабые, для которых значение множителя релаксации наиболее существенно отличается от единицы (при выполнении условий (7)).

Далее будут рассматриваться в основном зависимости $R_h(\lambda)$, обладающие свойством

$$R_h(\lambda) \rightarrow 1 \quad (h \rightarrow 0). \quad (9)$$

В этом случае из равенства

$$\|x^{k+1} - x^k\| = \sum \xi_{i,k}^2 [R_h(\lambda_i) - 1]^2 \quad (10)$$

следует, что для $\forall \xi_k \in R^1$ всегда можно выбрать такой h_k , что $\|x^{k+1} - x^k\| \leq \zeta_k$. Таким образом, с помощью параметра h_k можно регулировать норму вектора продвижения в пространстве управляемых параметров с целью предотвращения выхода из области справедливости локальной квадратичной модели (3).

Иногда для ограничения нормы (10) параметр h может вводиться в схему оптимизации как множитель в правой части (2):

$$x^{k+1}(h) = x^k - hH_k J'(x^k), \quad h \in [0, 1]. \quad (11)$$

При этом $\|x^{k+1}(h) - x^k\| = h\|x^{k+1}(1) - x^k\|$, а второе равенство (11) трансформируется к виду

$$f(x^{k+1}) = 1 / 2 \sum_{i=1}^n \xi_{i,k}^2 \lambda_i \bar{R}^2(\lambda_i),$$

где $\bar{R}(\lambda_i) = (1-h) + hR(\lambda_i)$. Таким образом, новые множители релаксации $R(\lambda_i)$ принимают промежуточные значения между единицей и $R(\lambda_i)$, что и требуется для обеспечения свойства релаксационности, определяемого требованиями (7).

Введенное понятие функции релаксации позволяет с единых позиций оценить локальные свойства различных градиентных схем поиска. Удобство такого подхода заключается также в возможности использования наглядных геометрических представлений.

Для любого метода (2) можно построить функцию релаксации, характеризующую область его релаксационности в множестве собственных чисел. Требуемый характер функции релаксации представлен на рис. 1. Заштрихована запрещенная область, где условия релаксационности (7) не выполняются.

Очень важное свойство функций релаксации заключается в возможности использования соответствующих представлений для *синтеза новых процедур* из класса (2), обладающих некоторыми желательными свойствами при решении конкретных классов задач оптимизации.

Важный класс прикладных задач конечномерной оптимизации составляют *плохо обусловленные*

(жесткие) задачи [1]. Локальная характеристика (индекс) жесткости для некоторого функционала $J(x)$ в точке x задается выражением

$$\eta(x) = \lambda_1(x) / \left| \min_i \lambda_i(x) \right|.$$

Здесь $\lambda_i(x)$ – собственные числа невырожденной матрицы $J''(x)$, удовлетворяющие по предположению неравенствам вида $\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_{n-r} \gg |\lambda_{n-r+1}| \geq \dots \geq |\lambda_n|$.

При наличии указанного «разброса» собственных чисел в некоторой окрестности точки x возникают существенные вычислительные трудности при минимизации функционала $J(x)$ в этой окрестности. Для вырожденных матриц $J''(x)$ индекс жесткости полагается равным бесконечности. Легко видеть, что жесткие матрицы $J''(x)$ (матрицы с высокими индексами жесткости) являются частным случаем матриц с большими спектральными числами обусловленности. Если высокий индекс жесткости для функционала $J(x)$ сохраняется в некоторой области пространства поиска, то поверхности уровня функционала приобретают характерную «овражную» структуру, хорошо известную специалистам по компьютерной оптимизации. Обычно замедление сходимости поисковых методов оптимизации возникает в области, называемой «дном оврага» и аппроксимируемой подпространством, натянутым на собственные векторы, отвечающие «малым» собственным числам.

С помощью понятия ФР можно вполне наглядно (геометрически) оценить вычислительные возможности конкретной градиентной схемы при минимизации жестких функционалов.

Классические градиентные схемы

Рассмотрим некоторые конкретные методы (2) и отвечающие им функции релаксации.

Простой градиентный спуск (ПГС). Формула метода ПГС имеет вид

$$x^{k+1} = x^k - hJ'(x^k) \quad (h = \text{const}). \quad (12)$$

Соответствующая функция релаксации

$$R(\lambda) = 1 - h\lambda \quad (13)$$

линейна и представлена на рис. 2.

Пусть собственные значения матрицы A_k расположены в замкнутом интервале $[m, M]$, причем $0 < m \leq M$ так, что $\eta(x) = M/m \gg 1$. В этом случае условие (9), очевидно, выполняется, а неравенства (7) сводятся к требованию $|R(\lambda_i)| \leq 1, i = \overline{1, n}$ или

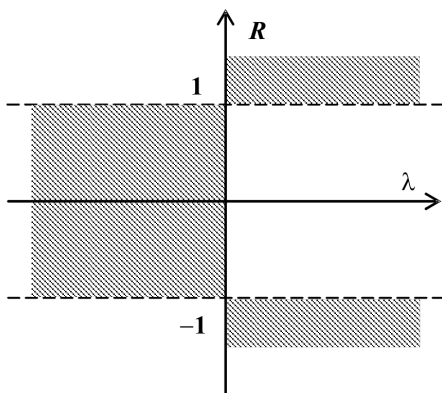


Рис. 1. Области релаксационности градиентного метода

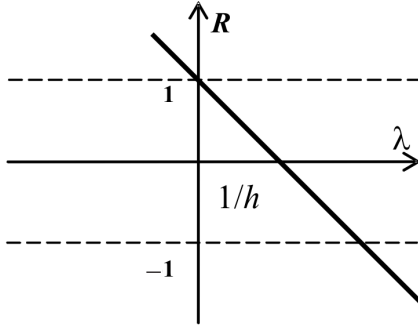


Рис. 2. Функция релаксации метода простого градиентного спуска

$$|1 - h\lambda_i| \leq 1, i = \overline{1, n}. \quad (14)$$

Из неравенства (14) следует $h \leq 2/M$, $R(m) = 1 - hm \approx 1$. Точка пересечения прямой $R(\lambda)$ с осью абсцисс есть точка $\lambda = 1/h$ и, чтобы при $\lambda \in [m, M]$ зависимость $R(\lambda)$ находилась в разрешенной области, необходимо выполнение неравенства $1/h \geq M/2$ (рис. 2). При этом ординаты функции релаксации характеризуют соответствующие множители релаксации, которые в окрестности $\lambda = m$ будут тем ближе к единице, чем больше отношение M/m . Будем считать, что для собственных чисел матрицы A_k выполняются неравенства $\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_{n-r} \geq \sigma |\lambda_{n-r+1}| \geq \dots \geq \sigma |\lambda_n|$, $\sigma \gg 1$, характерные для овражной ситуации. Тогда для точки $x^k \in Q$, где Q — дно оврага, имеем согласно (10)

$$\|x^{k+1} - x^k\| \cong 4 \sum_{i=n-r+1}^n \xi_{i,k}^2 (\lambda_i / \lambda_1)^2 \leq 4\sigma^{-2} \|x^k\|^2,$$

что может быть существенно меньше ξ_k .

В результате соответствующие малым собственным значениям из окрестности $\lambda = 0$ слагаемые в выражении (8) почти не будут убывать, а продвижение будет сильно замедленным. Это и определяет низкую эффективность метода (12).

В области $\lambda < 0$ функция (13) удовлетворяет условиям релаксации при любом значении параметра h . Параметр h в методе ПГС выбирается из условия монотонного убывания функционала на каждом шаге итерационного процесса. При отсутствии убывания величина h уменьшается до восстановления релаксационности процесса. Существуют различные стратегии выбора h , однако при больших η все эти методы, включая и метод наискорейшего спуска

$$x^{k+1} = \arg \min J[x^k - hJ'(x^k)],$$

малоэффективны даже при минимизации сильно

выпуклых функционалов. Так же как и в методе покоординатного спуска, здесь возможна ситуация заклинивания, представленная на рис. 3.

Метод ПГС представляет определенный интерес как средство оценки локальной степени жесткости в окрестности точки замедления алгоритма. Выведем соответствующие соотношения.

Пусть замедление метода ПГС при минимизации некоторого функционала $J(x)$ произошло в окрестности некоторой точки x^0 . Тогда можно предположить, что достаточно длинный отрезок последовательности $\{x^k\}$, построенный из точки x^0 , будет оставаться в области $\|x - x^0\| \leq \zeta_0$ и для $J(x)$ справедлива квадратичная аппроксимация:

$$f(x) = 1/2 \langle Ax, x \rangle - \langle b, x \rangle. \quad (15)$$

Метод (12) для аппроксимации (15) примет вид

$$x^{k+1} = x^k - h(Ax^k - b) = Bx^k + g, \quad (16)$$

где $B = E - hA$; $g = hb$.

Записывая (16) для двух последовательных номеров k и вычитая полученные равенства, приходим к соотношению

$$\begin{aligned} y^k &= x^{k+1} - x^k = B(x^k - x^{k-1}) = \\ &= B^k(x^1 - x^0) = B^k y^0. \end{aligned} \quad (17)$$

Согласно степенному методу определения максимального собственного числа симметричной матрицы в результате проведения процесса (17) может быть получена оценка максимального собственного числа матрицы B :

$$\|y^{k+1}\| / \|y^k\| \rightarrow \max_i |\lambda_i(B)| \quad (k \rightarrow \infty). \quad (18)$$

Пусть шаг h в итерационном процессе (12) выбирается из условия релаксационности, тогда можно заключить, что $h \cong 2/M$. Пусть $\lambda_i(A) \in [-m, M]$,

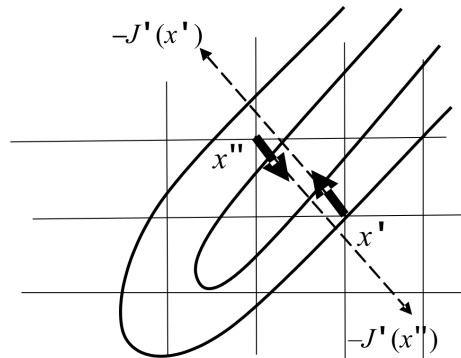


Рис. 3. Заклинивание метода простого градиентного спуска: $J(x'') > J(x')$

$M > m > 0$. В результате имеем $\max |\lambda_i(B)| = 1 + mh$. Следовательно, для достаточно больших k

$$\begin{aligned} & \|y^{k+1}\| / \|y^k\| = \\ & = \|J'(x^{k+1})\| / \|J'(x^k)\| = \mu \approx 1 + mh. \end{aligned} \quad (19)$$

Приходим к требуемой оценке степени овражности функционала $J(x)$ в окрестности точки x^0 :

$$\eta(x^0) = M/m \cong 2/(\mu_k - 1).$$

Рассуждая аналогично, для случая $\lambda_i(A) \in [m, M]$ получаем вместо (19) равенство $\mu_k \approx 1 - mh < 1$ и соответствующую оценку $\eta(x^0) \approx 2/(1 - \mu_k)$. Общая оценка может быть записана в виде $\eta(x^0) \approx 2/|1 - \mu_k|$, причем, сравнивая μ_k с единицей, можно установить характер выпуклости $J(x)$ в окрестности точки x^0 , что дает дополнительную полезную информацию.

Метод Ньютона основан на построении квадратичной аппроксимации функционала $J(x)$ в окрестности текущей точки x^k :

$$\begin{aligned} J(x) \cong f(x) &= J(x^k) + \langle x - x^k, J'(x^k) \rangle + \\ &+ 1/2 \langle J''(x^k) (x - x^k), x - x^k \rangle. \end{aligned}$$

В качестве x^{k+1} выбирается точка, удовлетворяющая уравнению $f'(x) = 0$. В результате приходим к формуле

$$x^{k+1} = x^k - h_k A_k^{-1} J'(x^k); A_k = J''(x^k). \quad (20)$$

С помощью дополнительно введенного параметра h_k , как указывалось ранее, осуществляется регулировка нормы вектора продвижения $\|x^{k+1} - x^k\|$.

Таким образом, по построению метод Ньютона является оптимальным для квадратичных функционалов при условии положительной определенности матрицы A_k . Минимум сильно выпуклого квадратичного функционала находится за один шаг при $h_k = 1$.

Главный недостаток метода заключается в следующем. Если функционал $J(x)$ не является выпуклым в окрестности точки x^k , то это может послужить причиной расходимости. Действительно, допустим, что функционал $J(x)$ аппроксимируется невыпуклым квадратичным функционалом. В этом случае ньютоновское направление $p^k = A_k^{-1} J'(x^k)$ указывает на точку x' , удовлетворяющую условию $f'(x') = 0$. Такой точкой может оказаться, например, седловая точка, а не точка минимума, как в выпуклой ситуации. В результате направление p^k будет указывать «наверх», а не «вниз» (рис. 4).

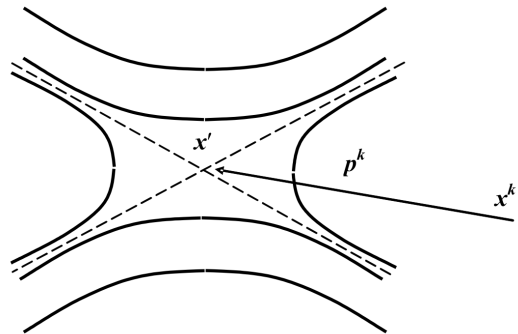


Рис. 4. Расходимость метода Ньютона

Заметим, что полная потеря работоспособности алгоритма Ньютона в невыпуклых экстремальных задачах происходит независимо от наличия или отсутствия овражной ситуации. Такая особенность методов ньютоновского типа существенно ограничивает область их практического применения, т. к. уже простейшие задачи оптимизации могут приводить к невыпуклым критериям.

На языке функций релаксации это обстоятельство проявляется в попадании графика функции релаксации метода (20)

$$R(\lambda) = 1 - H(\lambda, h_k) \lambda = 1 - h_k$$

в запрещенную область, где не выполняются неравенства (7). Действительно, при $h_k = 1$, что соответствует классическому варианту метода Ньютона без регулировки шага, имеем $R(\lambda) \equiv 0$ при $\forall \lambda \neq 0$. И аналогично при любых значениях h_k прямая релаксации $1 - h_k$ параллельна оси абсцисс и захватывает запрещенную область либо при $\lambda > 0$, либо при $\lambda < 0$. Положение ее при $h = 0$ соответствует остановке процесса. В указанных условиях эффективный выбор h_k оказывается затруднительным.

Аналогичным недостатком обладают многие из аппроксимирующих метод Ньютона квазиньютоновских алгоритмов и совпадающих с ними при минимизации квадратичных функционалов методов сопряженных направлений. Все эти методы по эффективности приближаются к методу ПГС, если функционал $J(x)$ в окрестности x^k не является выпуклым.

Традиционное возражение против метода Ньютона, связанное с необходимостью выполнения операции вычисления вторых производных целевого функционала, для реальных задач оптимизации оказывается менее существенным.

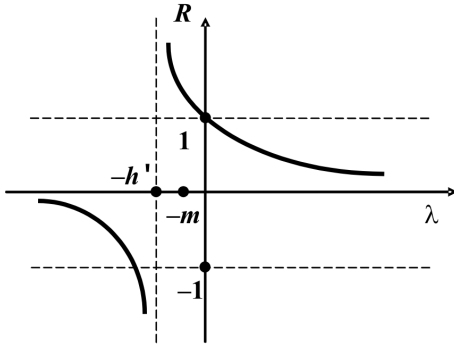


Рис. 5. Функция релаксации ЛМ-метода

Метод Левенберга–Маркуардта (ЛМ-метод) [2]. Если известно, что собственные значения матрицы A_k расположены в интервале $[-m, M]$, где $M \gg m$, то можно построить метод, имеющий нелинейную ФР (рис. 5)

$$R(\lambda) = h' / (h' + \lambda) \quad (h' > 0, h = 1/h'), \quad (21)$$

удовлетворяющую требованиям (7) при $\forall \lambda \in [-m, M]$, если $h' > m$.

Соответствующий метод предложен Левенбергом и имеет функцию $H(\lambda, h) = [1 - R(\lambda)] / \lambda = (h' + \lambda)^{-1}$.

Схема метода (2) с указанной функцией H имеет вид

$$x^{k+1} = x^k - [h'E + J'(x^k)]^{-1} J'(x^k). \quad (22)$$

Скаляр h' на каждом шаге итерационного процесса подбирается так, чтобы матрица $h'E + J'(x^k)$ была положительно определена и чтобы $\|x^{k+1} - x^k\| \leq c_k$, где c_k может меняться от итерации к итерации.

Из последнего выражения следует, что мы имеем регуляризованную форму метода Ньютона с параметром регуляризации h' . Данная форма метода Ньютона применялась Левенбергом для решения задач метода наименьших квадратов. Существенно позже данный метод применялся Маркуардтом для решения общих задач нелинейной оптимизации и иногда встречается его описание в литературе под названием «метод Маркуардта».

Реализация метода (22) сводится к решению на каждом шаге линейной алгебраической системы:

$$\begin{aligned} [h'E + J''(x^k)] \Delta x^k = \\ = -J'(x^k) (\Delta x^k = x^{k+1} - x^k). \end{aligned} \quad (23)$$

Главный недостаток метода легко увидеть на

графике ФР. Он заключается в необходимости точного подбора параметра h' , что сопряжено с известными вычислительными трудностями. Значение m , как правило, неизвестно и не может быть вычислено с приемлемой точностью. При этом оценка для m существенно ухудшается при возрастании размерности n . Лучшее, что обычно можно сделать на практике, это принять

$$h' \geq \max \{ \varepsilon_M n \|J_k''\|, |\min \lambda_i(J_k'')| \}. \quad (24)$$

Правая часть неравенства (24) обусловлена тем, что абсолютная погрешность представления любого собственного числа матрицы J_k'' ввиду ограниченности разрядной сетки равна

$$|d\lambda_i| \leq n\lambda_i \varepsilon_M \approx n \|J_k''\| \varepsilon_M.$$

При невыполнении условия $h' > m$ система (23) может оказаться вырожденной. Кроме этого, слева от точки $\lambda = -h'$ функция релаксации быстро входит в запрещенную область и метод может стать расходящимся. Попытки использования алгоритмического способа более точной локализации h' приводят к необходимости многократного решения плохо обусловленной линейной системы (23) с различными пробными значениями h' .

Число обусловленности матрицы $h'E + J''(x^k)$ может превышать спектральное число $\text{cond}[J''(x^k)]$. Действительно, потребуем, например, чтобы $R(-m) = 10$ для обеспечения заданной скорости убывания $J(x)$. Определим необходимое значение параметра h' . Имеем $1/(1-hm) = 10$ или $h' = 1/h = m/0,9$. В этом случае $\lambda_{\min}(h'E + J_k'') = -m + m/0,9 = m/9 > 0$. Принимая $\lambda_{\max}(h'E + J_k'') \approx \lambda_{\max}(J_k'')$, получаем, что $\text{cond}(h'E + J_k'') \approx 9 \lambda_{\max}(J_k'') / \lambda_{\min}(J_k'')$.

При выборе заведомо больших значений h' , что реализуется, например, когда определяющим в (24) является первое выражение в скобках, имеем $m \ll h'$ и $|R(-m)| \approx 1$, что приводит к медленной сходимости. Ограничение h' снизу не позволяет также уменьшить до желаемого значения множитель релаксации для $\lambda > 0$.

Эти трудности возрастают при аппроксимации производных конечными разностями, т. к. при малых значениях $J'(x^k)$ для точек x^k , расположенных на дне оврага, приходим к необходимости получать компоненты вектора градиента как малые разности относительно больших величин порядка $J(x^k)$. В результате компоненты вектора Δx^k будут находиться с большими относительными погрешностями порядка $\eta(x^k) \varepsilon_M J(x^k) / \|J'(x^k)\|$.

Индекс овражности η в этом случае играет роль своеобразного коэффициента усиления погрешности. Для метода Ньютона справедливо аналогичное замечание. В то же время для метода ПГС точность задания $J'(x^k)$ может оказаться достаточной для правильного указания направления убывания $J(x)$.

Несмотря на отмеченные недостатки, метод (23) часто оказывается достаточно эффективным и его присутствие в библиотеке методов оптими-

зации следует признать весьма желательным.

Аппарат функций релаксации позволяет производить полный анализ любой матричной градиентной схемы компьютерной оптимизации. Аналитическая связь между ФР и матричным множителем в градиентном методе позволяет по заданной ФР строить соответствующий метод оптимизации с заданными релаксационными свойствами. По существу предложен «генератор» новых методов градиентного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черноруцкий, И.Г. Методы оптимизации. Компьютерные технологии [Текст] / И.Г. Черноруцкий. –СПб.: БХВ – Петербург, 2011. –384 с.

2. Гилл, Ф. Практическая оптимизация [Текст] / Ф. Гилл, У. Мюррей, М. Райт. –М.: Мир, 1985. – 509 с.

УДК 510.67

В.Г. Бурлов, Е.А. Зенина, А.В. Матвеев

СИНТЕЗ МОДЕЛИ И СПОСОБОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ КОНФЛИКТА

При моделировании сложных систем необходимо учитывать, что объекты различной физической природы функционируют в какой-то среде или вступают с другими объектами в определенные отношения [1]. Поэтому в ходе моделирования требуется учитывать, что в исследуемом процессе принимают участие как минимум две стороны (А, В). Их взаимодействие рассматривается как конфликт с несовпадающими, в общем случае, интересами. Конфликт возникает при столкновении интересов, при желании сторон занять несовместимые позиции и т. п.

В целом проблема конфликта имеет богатую литературу и немалые научные традиции. В монографии [2] рассмотрены вопросы построения математических моделей трудно формализуемых конфликтных ситуаций, не относящихся к стандартной теории игр и статистических решений. Определяются цели и задачи урегулирования конфликтов, исследуются пути стабилизации и равновесия в условиях неполной информации. Приводятся некоторые математические модели оценивания взаимного контроля конфликтующих сторон. Формализуются процедуры формирования соглашений в конфликтных ситуациях.

В [3] конфликт рассмотрен как способ взаимодействия сложных систем. Формируются математические структуры и функциональные пространства описания конфликтов, учитывающие многомерность и размерность процессов, их нелинейность, большое число степеней свободы, память и взаимную рефлексию конфликтующих сторон. Разработана математическая модель конфликта и исследованы ее свойства.

В ряде работ конфликт исследовался на основе математической теории игр, отыскивался путь к достижению «оптимального» решения [4]. Конечно, методы решения задач теории игр обладают значительными возможностями для количественного оценивания результатов разрешения конфликтов. Это широкий спектр методов решения задач матричных игр [5], методов решения непрерывных игр [6], методов решения позиционных игр [7].

Отдельно следует остановиться на методах решения задач теории дифференциальных игр, особенно при наличии проблем учета динамической сущности рассматриваемого процесса, а аппарат теории дифференциальных игр как никакой другой способен наиболее полно учесть эту динамику.

Первой монографией из этой области знаний является [8], в которой на аналитических примерах с использованием уравнений, аналогичных уравнению Беллмана, проиллюстрированы возможности дифференциальных игр. Большой вклад в эту теорию внесла школа Л.С. Понтрягина [9].

Кроме того, получены фундаментальные результаты в данном направлении в работах [10, 11].

Несмотря на значительное количество публикаций, теорию решения дифференциальных игр (особенно численные методы решения) не в полной мере можно считать совершенной, в первую очередь, потому, что получение седловой точки требует принадлежности стратегий управления к компактным множествам. Однако, как правило, эти стратегии обладают свойством слабой сходимости. Другая крупная проблема – это учет ограничений на фазовые траектории. Как раз на преодоление этих трудностей и направлены исследования в рамках настоящей статьи.

Для моделирования систем наибольшее распространение получили множественная и структурно-математическая системные концепции математики [1]. На основе этих концепций определяются общие пути решения подобных задач, а также необходимая база для математиче-

ского моделирования систем, но эти концепции не позволяют формально определить систему. Предлагается применять подход, выходящий за рамки традиционных, используемых при решении практических задач [12, 13]. На основе логико-алгебраической системной концепции математики обоснована математическая структура, позволяющая с помощью введенной новой аксиоматики формально определить систему и тем самым учитывать ее конструкцию, применение и целевое предназначение (эффективность функционирования). Определена математическая связь между моделью системы, моделью действия и эффективностью функционирования. Такое конструктивное определение системы стало возможным благодаря введению специальной алгебраической операции, относящейся к новому направлению современной абстрактной алгебры, изучающему объекты, в которых алгебраические операции определенным образом связаны со свойствами несущего множества.

В рамках разрабатываемого инструмента конфликт предложено рассматривать не как синоним конфронтации, а как способ преодоления противоречий, форму взаимодействия сложных систем. Согласно предложенному подходу формализован принцип системности, представленный в виде уравнения:

$$\int_Q \varphi(r) dr = \int_Q \Phi(u(r), v(r), r) dr = I(Q). \quad (1)$$

↓ Модель действия
 ↓ Модель системы
 ↓ Результат замыкания

Входящими в уравнение (1) компонентами являются следующие: Q – множество требуемых пространственно-временных состояний (ПВС) системы при решении целевой задачи, $Q \subset R$, где R – множество возможных пространственно-временных состояний системы; I – показатель эффективности функционирования (ЭФ) системы; $\varphi(r) = \Phi(u(r), v(r), r)$ – потенциал поля эффективности (ППЭ) системы (производительность системы, распределенная в пространстве), где $u(r)$, $v(r)$ – векторы управления и возможностей системы, а $r \in Q$ – вектор требуемых пространственно-временных состояний (ТПВС) системы.

При данном подходе требуемая потенциальная ЭФ системы объединяет ПВС системы и технические возможности в единое целое, направленное на достижение целевых задач, а разра-

ботчик получает инструмент для синтеза системы с требуемыми свойствами. Структура множества Q является носителем возможностей системы и механизмов их реализации. Предназначение системы определяется, соответственно, с помощью интеграла (1).

Формирование структуры системы и распределение функций между ее элементами задается множеством G :

1. $X_{q_i} \subset X_q$;
2. $X_{q_i} \cap X_{q_j} = 0$, если $i \neq j$;
3. $\bigcup_{i \in [1, N]} X_{q_i} = X_q$;
4. $\sum_{i=1}^N \int_T (\Phi_i(u_i(t), v_i(t)) \cdot X_{q_i}) dt = I$,

где X_{q_i} – требуемые пространно-временные со-

стояния i -го элемента системы; X_q – требуемые пространственно-временные состояния системы в целом; N – количественный состав системы.

Необходимо учитывать, что эффективность функционирования той или иной системы является, в т. ч. и результатом противостояния объектов, в общем случае порождающем конфликт.

Структурная схема синтеза системы и способов ее функционирования при разрешении конфликта между субъектами А и В представлена на рис. 1. Субъектом под воздействием среды формируется в соответствии со своими интересами цель.

Цель достигается за счет разработки, формирования и применения соответствующей системы, показатель эффективности функционирования которой является мерой соответствия своего целевого предназначения. Ядро конфликта содержит механизмы формирования меры соответствия своего целевого предназначения.

Для получения количественных характеристик возможно использовать теорию дифференциальных игр. При этом надо понимать, что в силу своей неполноты теория дифференциальных игр позволяет лишь определять условия перехода системы из одного состояния в другое, а полностью обеспечивает разработанная методология. Она позволяет формировать множество требуемых пространственно-временных состояний системы.

Предложенный в [12, 13] подход к синтезу одновременно модели и способов функционирования системы позволяет определить свойства множеств требуемых пространственно-временных состояний разрабатываемой системы, а также задать сами эти множества в условиях конфликтной ситуации.

При рассмотрении противостояния сторон А и В необходимо отразить следующие три аспекта:

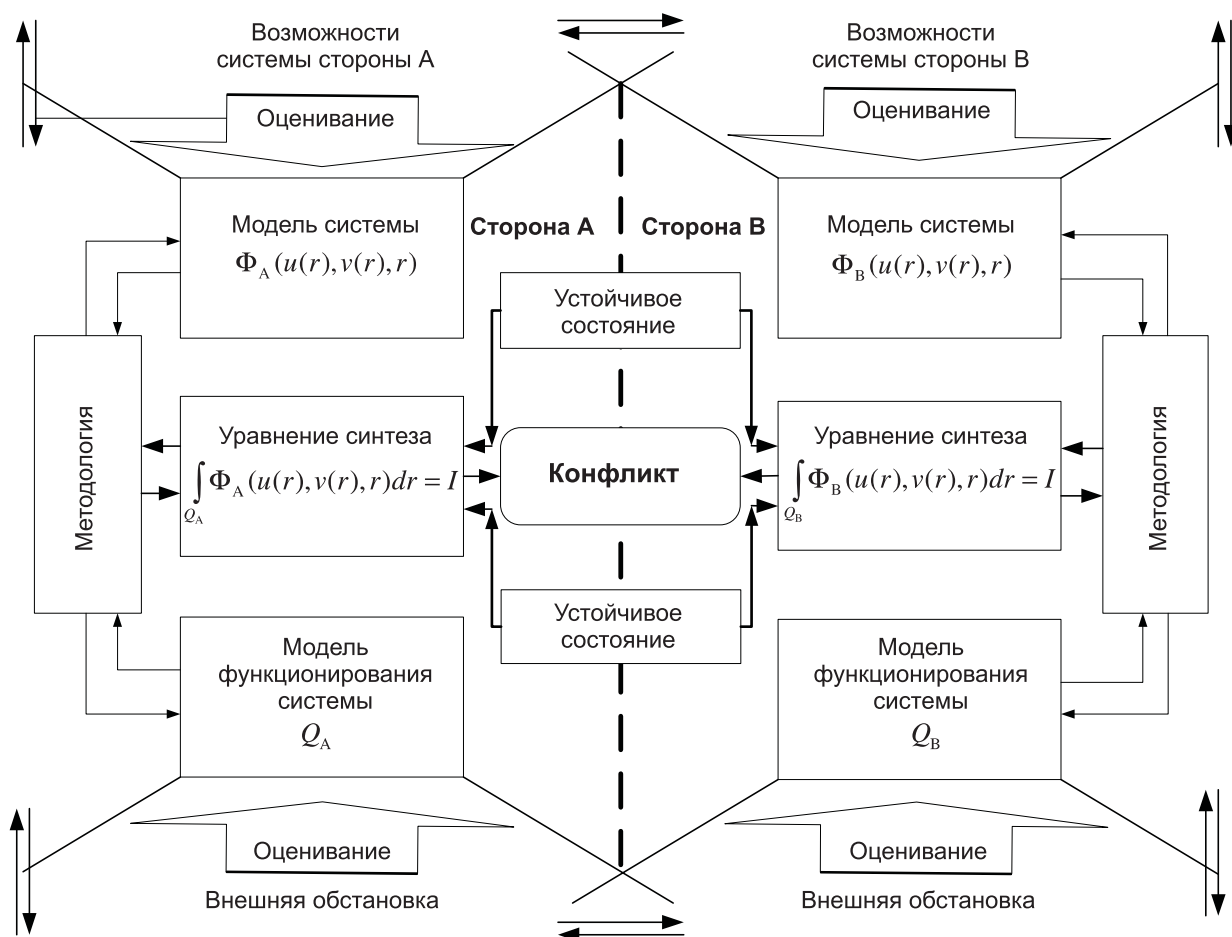


Рис. 1. Структурная схема синтеза системы в условиях конфликта

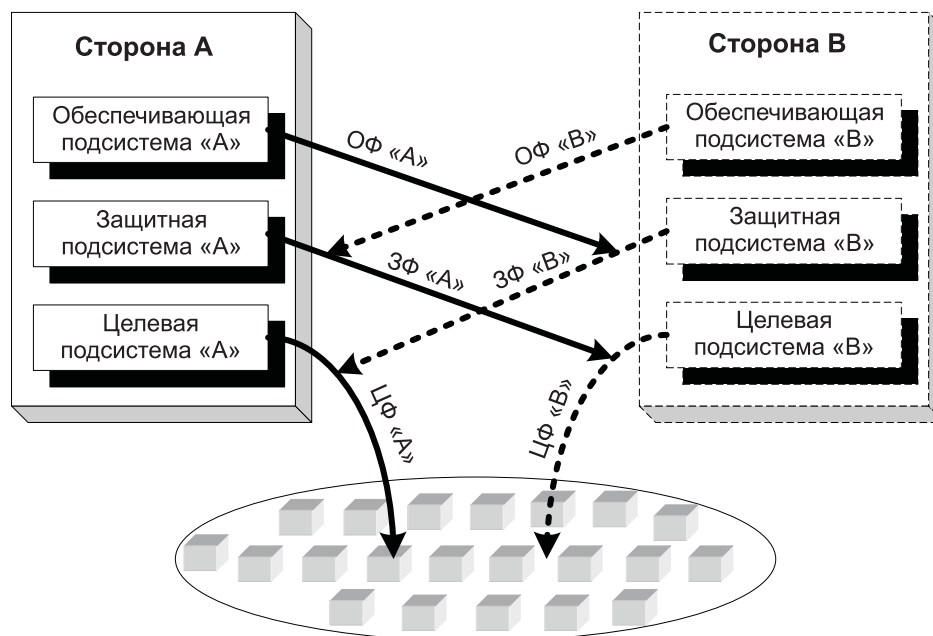


Рис. 2. Структурная схема взаимодействия трех базовых подсистем сторон при разрешении конфликта

1) синтез модели и способов функционирования системы в условиях противодействия, ее эволюция в соответствии с обстановкой;

2) синтез модели и способов функционирования систем стороны А при получении информации о технической (экономической, социальной и др.) составляющей стороны В;

3) прогнозирование развития противостоящих систем сторон А и В.

Не нарушая общности рассуждений, рассматривается противостояние двух сторон А и В, сформировавших соответствующие системы.

Система в общем виде должна выполнять три основные функции, реализуемые соответствующими подсистемами (рис. 2): целевую, защитную и обеспечивающую.

Поэтому правомерно предположить, что сторона А создает следующие подсистемы, выполняющие три перечисленные функции:

целевую подсистему (ЦПС «А»), предназначенную для решения целевых задач на соответствующем множестве пространственно-временных состояний;

защитную подсистему (ЗПС «А»), предназна-

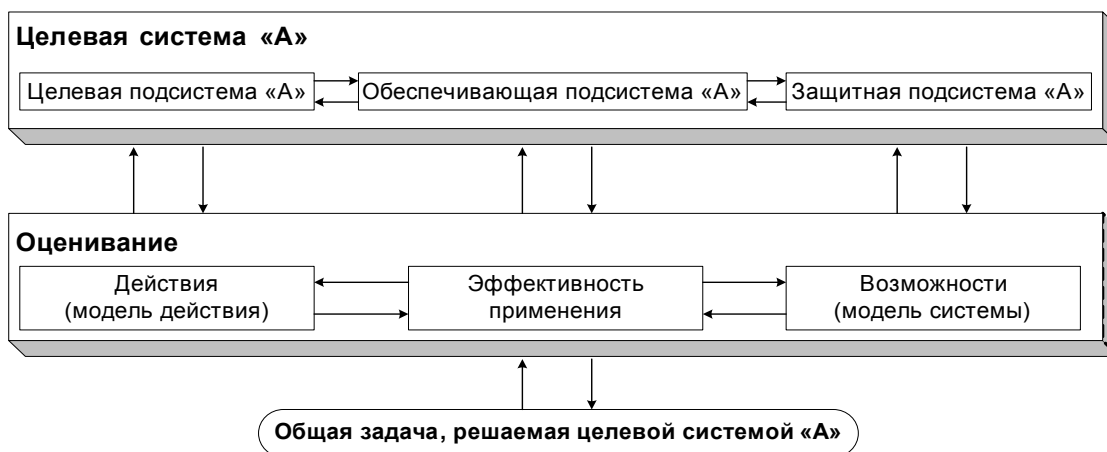


Рис. 3. Схема взаимосвязи основных подсистем целевой системы «А»

ценную для недопущения решения целевых задач целевой подсистемой стороны В на общем со стороной А целевом множестве;

обеспечивающую подсистему (ОПС «А»), защищающую целевую подсистему А от воздействия защитной подсистемы стороны В.

Возможности, механизмы их реализации, виды, способы и формы действий обеспечивающей подсистемы стороны А определяются в рамках схемы (рис. 3) через требуемый вклад в решение общей задачи целевой системы стороны А.

Дальнейшее наращивание количественного состава новых функций приведет к появлению подобных по содержанию уже существующих функций.

Аналогичные рассуждения применимы и для стороны В, создающей ЦПС «В», ЗПС «В», ОПС «В» для реализации соответствующих функций.

Исходя из предлагаемого подхода к синтезу одновременно модели и способов функционирования системы, необходимо сформировать множества требуемых пространственно-временных состояний Q_{ij} подсистем сторон А и В, а также потенциалы полей эффективности сторон $\varphi(r)$ при заданных значениях показателей эффективности действия сторон.

Потенциалы полей эффективности соответствующих подсистем сторон обозначены следующим образом:

$\varphi_{Ц}^{A(B)}$ – потенциал поля эффективности ЦПС стороны А (В);

$\varphi_3^{A(B)}$ – потенциал поля эффективности ЗПС «А» («В»);

$\varphi_O^{A(B)}$ – потенциал поля эффективности ОПС стороны А (В).

Учитывая, что обе стороны могут решать свои задачи на общем целевом множестве пространственно-временных состояний, что собственно и порождает конфликт, потенциалы полей эффективности подсистем будут претерпевать изменения ввиду их пересечений.

В табл. 1 представлены отношения потенциала полей эффективности целевой подсистемы «А» в условиях пересечений потенциалов полей эффективности перечисленных подсистем сторон А и В. В первой строке и первом столбце таблицы представлены потенциалы полей эффективности соответствующих подсистем, а на пересечении представлены их отношения (результатирующие потенциалы полей эффективности) соответствующих подсистем сторон.

В табл. 2 представлены отношения потенциала поля эффективности целевой подсистемы «В» и потенциалы полей эффективности перечисленных подсистем противостоящих сторон А и В.

Так, например, элемент $F_{11}^A(\varphi_{Ц}^A, \varphi_{Ц}^B)$ характеризует потенциал поля эффективности ЦПС «А» в условиях функционирования на совместном

Таблица 1

Матрица отношений потенциалов полей эффективности подсистем для ЦПС «А»

$\begin{matrix} A \\ B \end{matrix}$	$\varphi_{Ц}^A(r)$	$\varphi_3^A(r)$	$\varphi_O^A(r)$
$\varphi_{Ц}^B(r)$	$F_{11}^A(\varphi_{Ц}^A, \varphi_{Ц}^B)$	$F_{12}^A(\varphi_{Ц}^A, \varphi_{Ц}^B, \varphi_3^A)$	$F_{13}^A(\varphi_{Ц}^A, \varphi_{Ц}^B, \varphi_O^A)$
$\varphi_3^B(r)$	$F_{21}^A(\varphi_{Ц}^A, \varphi_3^B)$	$F_{22}^A(\varphi_{Ц}^A, \varphi_3^B, \varphi_3^A)$	$F_{23}^A(\varphi_{Ц}^A, \varphi_3^B, \varphi_O^A)$
$\varphi_O^B(r)$	$F_{31}^A(\varphi_{Ц}^A, \varphi_O^B)$	$F_{32}^A(\varphi_{Ц}^A, \varphi_O^B, \varphi_3^A)$	$F_{33}^A(\varphi_{Ц}^A, \varphi_O^B, \varphi_O^A)$

Таблица 2

Матрица отношений потенциалов полей эффективности подсистем для ЦПС «В»

$\begin{matrix} A \\ B \end{matrix}$	$\varphi_{Ц}^A(r)$	$\varphi_3^A(r)$	$\varphi_O^A(r)$
$\varphi_{Ц}^B(r)$	$F_{11}^B(\varphi_{Ц}^B, \varphi_{Ц}^A)$	$F_{12}^B(\varphi_{Ц}^B, \varphi_3^A)$	$F_{13}^B(\varphi_{Ц}^B, \varphi_O^A)$
$\varphi_3^B(r)$	$F_{21}^B(\varphi_{Ц}^B, \varphi_{Ц}^A, \varphi_3^B)$	$F_{22}^B(\varphi_{Ц}^B, \varphi_3^A, \varphi_3^B)$	$F_{23}^B(\varphi_{Ц}^B, \varphi_3^A, \varphi_O^A)$
$\varphi_O^B(r)$	$F_{31}^B(\varphi_{Ц}^B, \varphi_{Ц}^A, \varphi_O^B)$	$F_{32}^B(\varphi_{Ц}^B, \varphi_3^A, \varphi_O^B)$	$F_{33}^B(\varphi_{Ц}^B, \varphi_O^A, \varphi_O^B)$



множестве ЦПС «В». $F_{12}^A(\varphi_{11}^A, \varphi_{11}^B, \varphi_3^A)$ характеризует потенциал поля эффективности ЦПС «А» в условиях функционирования на совместном множестве ЦПС «В» и противодействия этой подсистеме ЗПС«А». $F_{13}^A(\varphi_{11}^A, \varphi_{11}^B, \varphi_0^A)$ характеризует потенциал поля эффективности ЦПС«А» в условиях функционирования на совместном множестве ЦПС«В» и ОПС«А». Однако $F_{13}^A(\varphi_{11}^A, \varphi_{11}^B, \varphi_0^A) = F_{11}^A(\varphi_{11}^A, \varphi_{11}^B)$ в силу того, что ОПС«А» не предназначена для борьбы с ЦПС«В». Аналогичным образом можно убедиться, что $F_{31}^A(\varphi_{11}^A, \varphi_0^B) = F_{32}^A(\varphi_{11}^A, \varphi_0^B, \varphi_3^A) = F_{33}^A(\varphi_{11}^A, \varphi_0^B, \varphi_0^A) = \varphi_{11}^A(r)$, в силу того, что в перечень задач ОПС«В» не входят задачи противостояния ЦПС«А». $F_{32}^A(\varphi_{11}^A, \varphi_0^B, \varphi_3^A) = \varphi_{11}^A(r)$ в силу того, что по своему целевому предназначению в перечень задач для ЗПС«А» и ОПС«В» не входит задача противостояния ЦПС«А». Аналогично рассуждая, можно проанализировать матрицу отношений ППЭ для стороны В (табл. 2).

Рассмотрев отношения ППЭ сторон, необходимо провести аналогичные исследования с множествами ТПВС (Q) соответствующих подсистем.

Отношение ТПВС противостоящих сторон характеризуется специальной мерой $Q_{ij} = \mu(Q_i^A \cap Q_j^B)$, где $i = \overline{1,3}$ – номера строк матрицы; $j = \overline{1,3}$ – номера столбцов матрицы (табл. 3); μ – мера множества пересечения ТПВС соответствующих подсистем сторон. Таким образом, мера пересечения ТПВС соответствующих подсистем определяет степень соприкосновения противостоящих подсистем.

На множестве пересечений требуемых ТПВС формируются отношения ППЭ, суть элементов матрицы (см. табл. 1, 2). На основе выявленных отношений ППЭ на множествах пересечений ТПВС формируется специальное множество и обобщенный ППЭ, своими свойствами удовлет-

воряющие требованиям достижения соответствующими подсистемами заданных показателей ЭФ. Физически обобщенные потенциалы поля эффективности являются в каждой точке пространства функцией специальной комбинации трех производительностей (интенсивностей деятельности) соответствующих подсистем сторон А и В [14].

На основе решения комплексной задачи синтеза модели и способов функционирования системы в условиях конфликта строится множество $Q \subset R$ и ППЭ в рамках разработанных базовых понятий, зависимостей и логических правил теории [3] в соответствии со структурной схемой синтеза системы (рассматривается для стороны А) следующим образом (рис. 4).

1. Исследуется проблема построения потенциальных ТПВС трех подсистем ЦПС«А»(«В»), ЗПС«А»(«В»), ОПС«А»(«В») на основе оценивания обстановки и достигнутых сторонами организационно-технических возможностей.

2. Разрабатывается система формирования ППЭ трех подсистем – ЦПС«А»(«В»), ЗПС«А»(«В»), ОПС«А»(«В») на основе оценивания обстановки и достигнутых сторонами организационно-технических возможностей, строятся матрицы отношений ППЭ.

3. Формируется матрица отношений ТПВС ($Q \subset R$) подсистем сторон на основе определения меры пересечения множеств $Q \subset R$.

4. В рамках концепции единства системы обобщаются виды, способы и формы действий, разрабатываются базовые элементы замысла операции, решения на ее проведение.

5. Строится модель оценивания ЭФ соответствующих структур противостоящих сторон, передающая масштабы и динамику взаимодействия сторон, согласно уравнению (1).

6. Разрабатываются предложения по количественному и качественному составу подсистем противостоящих сторон, исходя из обеспечения устойчивого состояния системы. Условием устойчивости является $I \in [I_M^*, I_{\Pi}^*]$, где I – показатель ЭФ системы; I_{Π}^* – потенциальная (предельно возможная) ЭФ системы; I_M^* – предельно допустимая ЭФ, при которой система утрачивает свое целевое предназначение. Если выполняется условие $I \in [I_M^*, I_{\Pi}^*]$, то система удовлетворяет своему целевому предназначению.

Предложенный подход к разработке системы в условиях конфликта позволяет достаточно полно для практики отразить основную сущность

Таблица 3

Матрица отношений множеств ТПВС подсистем сторон

А	В		
	Q_{11}^B	Q_3^B	Q_0^B
Q_{11}^A	Q_{11}	Q_{12}	Q_{13}
Q_3^A	Q_{21}	Q_{22}	Q_{23}
Q_0^A	Q_{31}	Q_{32}	Q_{33}



Рис. 4. Структурная схема синтеза системы в условиях конфликта

процесса функционирования системы и осуществить ее синтез.

Для случая противостояния сторон А и В векторы пространственно-временных состояний определяются следующим образом:

$$q_i^A = \langle x_{q_i}^A, t_{q_i}^A \rangle = \Theta_i^A((U^A, V^A, u^A(r), v^A(r)), (U^B, V^B, u^B(r), v^B(r))), i \in [1, N],$$

$$q_j^B = \langle x_{q_j}^B, t_{q_j}^B \rangle = \Theta_j^B((U^B, V^B, u^B(r), v^B(r)), (U^A, V^A, u^A(r), v^A(r))), j \in [1, M],$$

где $u^{A(B)}(r) \in U^{A(B)}$, $v^{A(B)}(r) \in V^{A(B)}$, $U^{A(B)}$ – множества управления; $V^{A(B)}$ – множества возможностей; $x_{q_i(j)}^{A(B)}$ – компоненты, отражающие состояния элементов систем; $t_{q_i(j)}^{A(B)}$ – временные характеристики состояний элементов систем; $N(M)$ – количественный состав систем.

В этом случае решение задачи синтеза при заданном множестве G сведется к отысканию экстремумов:

$$\begin{aligned} &\text{extr } I^A((U^A, V^A, u^A(r), v^A(r)), \\ &\quad (U^B, V^B, u^B(r), v^B(r))), \\ &\text{extr } I^B((U^B, V^B, u^B(r), v^B(r)), \\ &\quad (U^A, V^A, u^A(r), v^A(r))). \end{aligned}$$

Решение задачи синтеза при нефиксированном множестве G и заданных U, V сторон сведется к отысканию экстремумов:

$$\text{extr } I^A(G^A, G^B); \text{extr } I^B(G^B, G^A).$$

Рассмотренная методология синтеза модели системы и способов ее функционирования в рамках отношений двух сторон позволяет разработать совокупность конструктивных методов и моделей построения и использования соответствующих подсистем сторон. Для этого необходимо и достаточно регламентировать элементы множества G базовыми зависимостями достижения результата и естественнонаучными законами предметной области. Практические решения задач моделирования систем в условиях конфликта в рамках изученного подхода представлены в работах [13–16].

Таким образом, предложенный в статье инструмент позволяет обосновать подход к решению комплекса задач обеспечения требуемой ЭФ системы в условиях противостояния другой стороны, порождающего конфликтную ситуацию, а формализованный «принцип системности» позволяет разработать инструмент разрешения конфликта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильичев, А.В. Эффективность проектируемых элементов сложных систем [Текст] / А.В. Ильичев, В.Д. Волков, В.А. Грущанский. –М.: Высш. школа, 1982.
2. Саати, Томас Л. Математические модели конфликтных ситуаций [Текст] / Томас Л. Саати. –М.:

Сов. радио, 1977.

3. Дружинин, В.В. Введение в теорию конфликта [Текст] / В.В. Дружинин, Д.Г. Конторов, М.Д. Конторов. –М.: Радио и связь, 1989.
4. Клини, Р.Л. Принятие решений при многих кри-



териях предпочтения и запрещения [Текст] / Р.Л. Клини, Г. Райфа. –М.: Радио и связь, 1977.

5. **Воробьев, Н.Н.** Матричные игры [Текст] / Под ред. Н.Н.Воробьева. –М.: ИФМЛ, 1961.

6. **Дрешер, М.** Стратегические игры. Теория и приложения [Текст] / М. Дрешер. –М.: Сов. радио, 1964.

7. **Воробьев, Н.Н.** Позиционные игры [Текст] / Под ред. Н.Н.Воробьева. –М.: Наука, 1967.

8. **Айзекс, Р.** Дифференциальные игры [Текст] / Р.Айзекс. –М.: Мир, 1967.

9. **Понтрягин, Л.С.** К теории дифференциальных игр [Текст] / Л.С. Понтрягин //УМН. –1966. –Т. 21. –Вып. 4.

10. **Бурков, В.Н.** Основы математической теории активных систем [Текст] / В.Н. Бурков. –М.: Наука, 1977.

11. **Новиков, Д.А.** Теория управления организационными системами [Текст] / Д.А. Новиков. –М.: МПСИ, 2005. –584 с.

12. **Бурлов, В.Г.** Общий подход к моделированию систем безопасности / В.Г. Бурлов, Г.Г. Магулян, А.В. Матвеев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. –2011. –С. 73–77.

13. **Бурлов, В.Г.** Основы моделирования социально-экономических и политических процессов (Методология. Методы): Учеб. пособие [Текст]/ В.Г. Бурлов. –СПб.: НП «Стратегия будущего», 2007.

14. **Матвеев, А.В.** Аналитическая модель системы управления пожарной безопасностью АЭС [Текст] / А.В. Матвеев, М.В. Иванов, А.Б. Шевченко // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. –2010. –С. 91–95.

15. **Матвеев, А.В.** Системное моделирование управления риском возникновения чрезвычайных ситуаций: Дис. ... канд. техн. наук [Текст]/ А.В. Матвеев. –2007.

УДК 004.021:004.023

А.А. Стяпшин

ОНТОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ГОРОДСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Как показывают проведенные исследования [1–7 и др.], управление городским хозяйством в настоящее время является актуальной задачей. В этой слабоструктурированной области управление ведется, в основном, опираясь на человека или группу людей, разрабатывающих планы по его развитию. Но в случае, когда решение задачи полностью зависит от человека, ошибки неизбежны. Отсутствие автоматизации и использование человеческих ресурсов увеличивает расходы. Ошибки при управлении городским хозяйством очень дороги и порой непоправимы. Использование процессов автоматизации позволяет анализировать и прогнозировать развитие города, его инфраструктуры, повышать эффективность управления городским хозяйством.

Город как объект исследования представляет собой совокупность физических и организационных структур (систем), обеспечивающих его жизнедеятельность: органы власти, службы, инженерные сети, здания и сооружения и пр. Эти гетерогенные структуры и составляющие их эле-

менты (объекты) функционально ориентированы на обеспечение различных аспектов человеческой деятельности, но при этом они взаимозависимы и взаимосвязаны. Эффективное управление городским хозяйством, поиск необходимой информации, прогнозирование последствий принятия тактических и, особенно, стратегических решений по изменению, развитию городской инфраструктуры требует наличия соответствующей модели.

Построение подобной модели городской инфраструктуры – сложная задача, т. к. она обусловлена целым рядом факторов, наиболее важными из которых являются следующие:

- город – сложная эволюционирующая и слабоструктурированная система, методологией исследования которой служит системный подход [1];

- высокое разнообразие и пространственное распределение функциональных элементов города (транспортная сеть, сети тепло- и водоснабжения, электрические, телекоммуникационные сети, объекты и сооружения и т. п.);

- высокая динамика процессов, протекающих в городской инфраструктуре, которая проявляется не только в изменении качественных и количественных характеристик объектов, но и в высокой интенсивности создания и удаления самих объектов (строительство и снос зданий, формирование и ликвидация предприятий, прокладка новых линий связи и т. д.);

- неопределенность и неоднозначность состояний объектов, входящих в городскую инфраструктуру, требует изучения динамики развития системы, анализа процессов роста, с учетом общего жизненного цикла города и его частей (население, предприятия, жилой фонд и др.);

- высокая степень разрозненности данных, представляющих различные аспекты функционирования городской инфраструктуры, усугубляется отсутствием единых форматов и стандартов представления и хранения подобной информации. Следствием этого является неоднозначность интерпретации одной и той же информации и необходимость согласования терминологии различных областей.

Цель данной статьи – попытка обобщить и систематизировать имеющиеся данные и разработки в области городской инфраструктуры. Используя полученный набор знаний, в последующем использовать их как основу для описания и создания онтологии городской инфраструктуры. Разработанная онтология городской инфраструктуры послужит инструментом для решения целого комплекса задач:

- управления системой в целом, отдельными подсистемами, выработки управленческих решений и стратегий;

- автоматизации системы, а также отдельных ее подсистем;

- прогнозирования выходных данных, ситуаций, состояний системы и ее поведения;

- поиска объектов и связей между ними;

- вывода новых объектов, еще не существовавших в онтологии, создания связей с ними;

- прогнозирования работы объектов и их взаимодействия и т. д.

Городская инфраструктура крайне сложна, множество ее объектов связано между собой большим количеством связей. Каждый из таких объектов может иметь множество зависимостей, сложную структуру, а также иметь разные свойства в зависимости от того, с какой точки зрения

он рассматривается. Например, любой городской объект можно рассмотреть относительно следующего:

- роли – для чего предназначен объект, какие функции он выполняет;

- местоположения – определение координат объекта в пространстве;

- организационной составляющей – связан ли объект с какой-либо организацией города;

- декомпозиции – из каких основных частей состоит объект, какова их иерархия и взаимодействие;

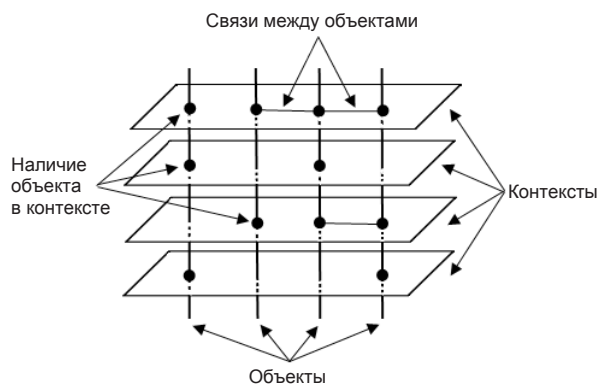
- сетевой составляющей – является ли объект частью некоторой сети (транспортной, электрической, водной и т. п.).

Так как город (городское хозяйство) является сложной системой, т. е. содержит большое количество взаимосвязанных и взаимодействующих между собой элементов, то его целесообразно рассматривать как связь отдельных, связанных между собой подсистем. Город состоит из городских объектов и каждый такой объект можно рассматривать с разных точек зрения внутри разных контекстов. Таким образом, проводя декомпозицию городской инфраструктуры как модели, в ней можно выделить две основные группы: *объекты* и *контексты*.

Объекты в системе не обязательно должны быть материальными, допускаются и абстрактные – нематериальные понятия. Так, объектами в модели города могут выступать различные сооружения (жилые и нежилые здания, строения, различные архитектурные сооружения и др.), организации, а также человек. Человек в системе может рассматриваться как юридическое и физическое лицо. То, с какой точки зрения происходит рассмотрение объекта, и служит контекстом для объекта.

Контексты являются своего рода уровнями, на которых происходит рассмотрение множества объектов и их взаимосвязи. Каждый контекст несет в себе определенный набор свойств и связей для объекта. Примером контекстов может являться функциональный контекст, пространственный, структурный и т. д. Схематическое представление и связь между объектами и контекстами представлена на рисунке.

Каждый объект может находиться в каком-либо контексте: иметь проекцию на него. Каждый объект в проекции представляется точкой графа, а связи между ними являются ребрами графа.



Город как система контекстов и объектов

Объект обязательно должен находиться хотя бы в одном контексте. Проекции в одном контексте могут быть связаны друг с другом. В то же время разные объекты в разных контекстах не могут быть напрямую связаны друг с другом. Но возможны косвенные связи, когда по связи объектов в одном контексте можно определить косвенные связи в других контекстах. Примером может служить рассмотрение двух классов и двух контекстов: человек и жилое здание в контекстах географического положения и городских адресов. Человек как таковой не имеет географического положения. Но его можно установить через связи с другими объектами, ведь человек как гражданин имеет прописку по определенному адресу, а по этому адресу находится определенное здание, координаты которого уже можно установить. Но человек также может быть представлен и как юридическое лицо, которое связано с некоторой организацией. Эта организация может иметь несколько филиалов, каждый из которых может иметь, а может и не иметь городской адрес. В свою очередь филиалы могут находиться в разных городах. Большое количество таких косвенных связей между объектами города усложняет анализ и моделирование данной системы.

Для определения маршрутов из одной точки города в другую можно использовать контекст транспортного слоя. В этом слое связь между двумя объектами будет в том случае, когда между ними есть дорожный маршрут. Для того чтобы

определить, можно ли найти дорожный маршрут от одного дома к другому, нужно найти проекции этих объектов на транспортный слой и в нем найти путь из одной точки в другую.

Для описания городской инфраструктуры автором предложено использовать онтологический подход. Онтология представляет собой набор объектов и отношений между ними [3]. Общего и оптимального алгоритма для построения онтологии не существует, т. к. лучшее решение почти всегда зависит от предполагаемого приложения и ожидаемых расширений [4]. Но в общем виде процесс построения онтологии можно представить следующими этапами:

- 1) определение базовых классов в онтологии и выделение их в таксономическую иерархию;
- 2) определение свойств классов и ограничений на эти свойства.

Разрабатываемая модель сможет описывать город с онтологической точки зрения: через классификацию этих объектов и их связи между собой. Онтологический подход к моделированию подобной системы будет заключаться в категоризации объектов. Рассмотрение каждого класса в рамках определенного контекста будет определять свойства данного объекта применительно к данному контексту. Так, все свойства объекта будут представлены совокупностью контекстовых свойств. Использование данной модели позволит точно классифицировать любой ее объект, описать все его свойства, а также найти его связи с другими объектами в системе.

Онтология позволит повторно использовать информацию, а также совместно использовать ее людьми и программными средствами [5]. Кроме этого онтология может использоваться электронными агентами, выполняющими поиск информации, а также для автоматизированного внедрения новых объектов в эту систему.

Таким образом, применение онтологического подхода позволит провести исследования городской инфраструктуры, применив кластеризацию объектов и определение свойств данных объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Система имитационного моделирования развития городской территории [Текст] / Всерос. науч. конф. Научный сервис в сети Интернет: тез. докл. –ФГАУ ГНИИ ИТТ «Информика», 2002.
2. **Бусленко, Н.П.** Моделирование сложных систем [Текст] / Н.П. Бусленко. –М.: Наука, 1968.
3. **Gruber, T.R.** A Translation Approach to Portable Ontology Specification [Text] / T.R. Gruber.

4. Noy, N.F. Ontology development 101: A guide to creating your first ontology [Text] / N.F. Noy, D.L. McGuinness.

5. Kuilboer, M.M. Knowledge Reuse: Temporal-Abstraction Mechanisms for the Assessment of Children's Growth [Text] / M.M. Kuilboer, Y. Shahar, D.M. Wilson [et al.].

6. Сизов, А.С. Моделирование на основе онтологий [Текст] / А.С. Сизов, В.П. Сергеев. –Новосибирск, 2010. –217с.

7. Борисов, А.В. Моделирование развития инфраструктуры [Текст] / А.В. Борисов [и др.]. –Пенза, 2011. –С. 101–108.

УДК 004.021

И.А. Ходырев, С.В. Попова

ОБНАРУЖЕНИЕ РАЗВИЛОК В МОДЕЛЯХ ПРОЦЕССОВ

В последнее десятилетие существенное развитие получила область информатики, именуемая в литературе *анализом процессов* (Process Mining) [6, с. 1]. В этой области объектом исследования выступают журналы событий (также называемые *логами*), порождаемые в процессе функционирования информационных систем управления бизнес-процессами, которые все чаще внедряются в различных организациях. В рамках анализа процессов вводится единая метамодель журналов событий, к которой может быть приведено большинство логов современных информационных систем предприятий. Предметом изучения дисциплины является нетривиальная информация о протекании процессов в организации, позволяющая лучше понять и оценить суть происходящего. При анализе процессов традиционно наибольшее внимание уделяется алгоритмам восстановления формальных

моделей, по которым протекали процессы. Эти алгоритмы обычно применяются для анализа реальных ситуаций протекания процессов на предприятиях [8].

Но существуют и другие направления исследований. Одно из таких направлений – автоматическое построение математических моделей бизнес-процессов организации, которые могут использоваться для прогнозирования различных аспектов ее деятельности [1, 2]. Обычно прогноз является ответом на некоторый заранее сформулированный вопрос, например: какова ожидаемая загрузка персонала в человеко-часах на следующей неделе; будет ли превышено потребление ресурса *X* в следующем месяце и др. Основное преимущество предлагаемого в рамках анализа процессов подхода к моделированию бизнес-процессов организации, заключается в объективности полученных результатов,

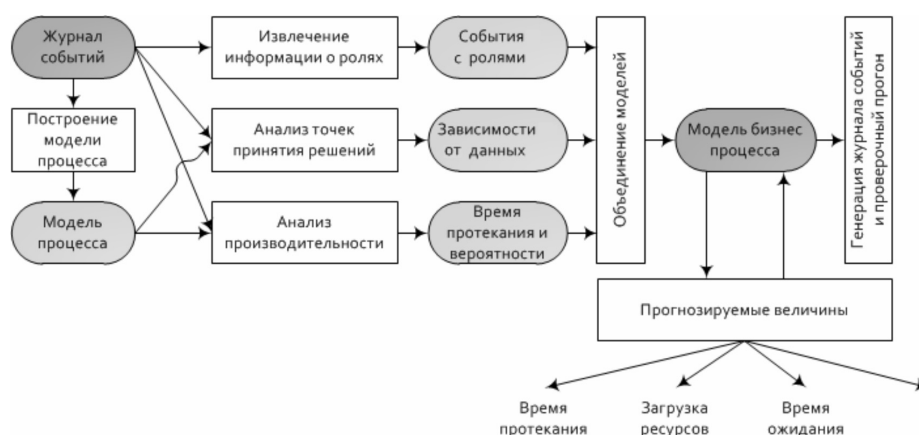


Рис. 1. Подход к построению модели бизнес-процесса организации

поскольку все элементы модели строятся автоматически по журналам событий, без привлечения субъективных мнений и навыков эксперта. Схема на рис. 1, взятая из [3], иллюстрирует этот подход.

Как видно из рисунка, исходным артефактом для анализа является журнал событий. Вначале он используется для построения модели процесса с помощью некоторого алгоритма из области анализа процессов. Существует множество алгоритмов, позволяющих извлекать модель процесса по журналам событий, например, α -алгоритм, эвристический алгоритм, генетический алгоритм и др. [6]. Важно отметить, что все эти алгоритмы предназначены для извлечения моделей процессов в виде сетей Петри, которые относятся (или могут быть преобразованы) к классу т. н. Sound Workflow Nets. Эти сети являются безопасными, активными и включают еще несколько свойств, описанных в [4]. Для оценивания качества полученной модели наиболее часто используются критерии, описанные в [2]. Задаче выбора алгоритма для построения модели процесса посвящено множество работ, и эта тема выходит за рамки данной статьи, поэтому во всех последующих рассуждениях мы допускаем, что модель процесса уже построена с использованием некоторого алгоритма и что она принадлежит классу Sound Workflow Nets. Во всех рассматриваемых примерах сетей Петри мы предполагаем, что они принадлежат классу Sound Workflow Nets; при рассмотрении отдельных конструкций, предполагаем, что демонстрирующие их сети являются безопасными.

Журнал событий также используется для извлечения информации о ролях и сопоставлении их событиям информационной системы. После

того как модель процесса построена, она вместе с журналом событий используется для проведения «анализа точек принятия решений» и «анализа производительности». Первый предполагает выявление зависимостей выбора, осуществляемого в рамках бизнес-процесса, от дополнительных данных, присутствующих в бизнес-процессе. Так, например, в рамках бизнес-процесса медицинских учреждений первичный диагноз, с которым поступает пациент, может существенно влиять на выбор назначаемых медиками процедур. Если диагноз будет отражен в соответствующем журнале событий, то на основе статистических данных можно спрогнозировать следующие шаги, предстоящие пациенту. «Анализ производительности» предполагает создание математических моделей времени протекания событий и вероятности выбора того или иного варианта в ситуации выбора в том случае, если невозможно построить однозначной зависимости выбора от данных в рамках «анализа точек принятия решений». В результате выполнения всех этапов строится итоговая модель бизнес-процесса предприятия, которая в дальнейшем используется для проведения экспериментов по симуляции исполнения бизнес-процесса в целях получения достоверных интервалов для требуемых показателей. Подробная реализация всех этих этапов описана в [3].

Для успешного завершения этапов «анализ точек принятия решений» и «анализ производительности» требуется определить, какие события могут происходить независимо друг от друга, а какие друг друга исключают. Рассмотрим пример модели в нотации сети Петри на рис. 2.

Здесь переходы $t2$ и $t3$ исключают друг друга, поскольку выбор $t2$ не позволит сработать $t3$ и на-

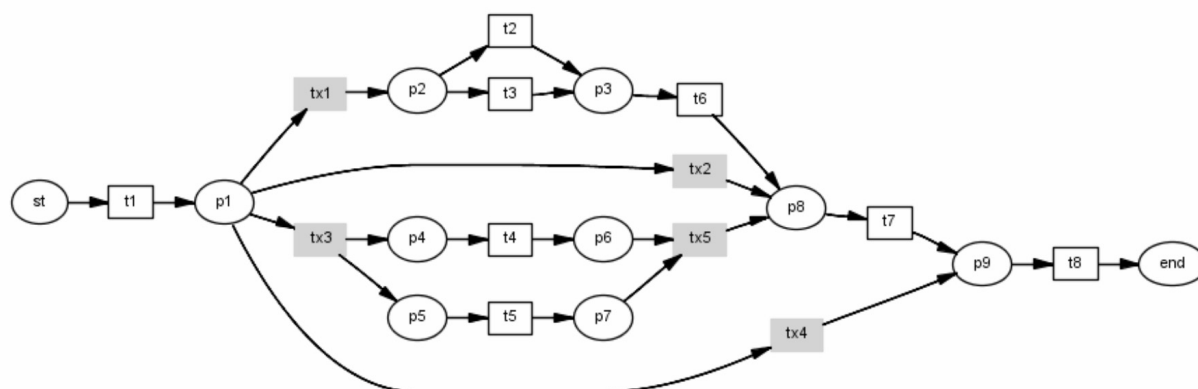


Рис. 2. Сеть Петри со скрытыми переходами

оборот¹. Это знание позволяет существенно улучшить модель бизнес-процесса. Предположим, из журнала событий нам известно, что переход t_3 срабатывает в среднем в 10 раз чаще, чем переход t_2 . Тогда, зная, что переходы t_2 и t_3 взаимоисключающие, при построении модели бизнес-процесса можно ввести механизм, который позволил бы учитывать относительные² вероятности срабатывания этих переходов при проведении экспериментов.

В работе [2] А. Розинат предложила алгоритм определения взаимоисключающих переходов для сетей Петри. Она использовала термин «точка принятия решения» для именования множества таких переходов. В данной статье мы будем придерживаться термина «развилка» в отношении них, поскольку не всегда существует субъект принятия решения, стоящий перед «выбором» в рамках бизнес-процесса. Листинг алгоритма можно посмотреть в [2, с. 242]. Алгоритм, предложенный Розинат, основывается на простой идее: если позиция сети Петри содержит больше одного выходного перехода, то тогда эти переходы должны исключать друг друга.

Нами уже была рассмотрена такая развилка на примере рис. 2. Действительно, позиция p_2 имеет два выходных перехода t_2 и t_3 , срабатывание одного из которых запрещает срабатывание другого. Однако возникает вопрос: как быть, если выходные переходы являются скрытыми? *Скрытыми* переходами называются такие переходы в итоговой модели процесса, которым в журнале событий не соответствует ни одно событие, но которые при этом участвуют в маршрутизации процесса. Простейшая конструкция со скрытыми переходами представлена на рис. 5 а. Здесь переход tx_1 является скрытым и его срабатывание означает, что ни один из переходов t_1 и t_2 не сработал, причем в журнале событий этот факт может быть никак не зафиксирован.

Итак, как быть с развилками, если в них должны попасть скрытые переходы, например в случае с позицией p_1 с рис. 2? Алгоритм Розинат предполагает, что мы можем отождествить следующие за скрытыми группы явных переходов с

объектами из которых реально производился выбор, но только до того момента, пока при анализе последователей нам не встретится позиция с двумя или более входными элементами, называемая *конструкцией объединения* (*join construct*).

Поясним работу алгоритма Розинат со скрытыми переходами на примере определения развилки для позиции p_1 (см. рис. 2). P_1 имеет четыре скрытых выходных перехода: tx_1 , tx_2 , tx_3 , tx_4 . В случае с переходами tx_1 и tx_3 , при поиске последователей мы обнаружим группы переходов: (t_2, t_3) и (t_4, t_5) соответственно. Поскольку сеть является безопасной, то эти группы переходов мы можем отождествить с вариантами, между которыми происходит выбор, когда жетон находится в позиции p_1 . Что касается переходов tx_2 и tx_4 , то сразу за ними следует конструкция объединения и алгоритм Розинат запрещает анализ последователей после него, поэтому переходы t_7 и t_8 , следующие за ними, не включаются в развилку.

Алгоритм, предложенный Розинат, на наш взгляд имеет два существенных недостатка.

Первый связан с тем, что он полностью игнорирует структуры типа «конфликт» в сетях Петри. Типичная конструкция конфликта представлена на рис. 3.

При конфликте, как и при взаимоисключающих переходах, существует некоторое множество переходов, не все из которых смогут сработать. Отличие заключается в том, что конфликт предполагает синхронизацию нескольких ветвей, которые могли до этого выполняться независимо. Ситуации конфликта, как и взаимоисключающие переходы, могут играть важную роль при моделировании. Алгоритм Розинат, примененный к сети с рис. 3, выделит в ней две развилки (t_3, t_4) и (t_4, t_5) . Это некорректно, поскольку в действительности имеет место единственная развилка (t_3, t_4, t_5) , возникающая, когда все три перехода являются разрешенными. Даже если мы будем обладать информацией о частоте срабатывания переходов в развилке, как ее понимает Розинат, этой информации будет недостаточно³ и потребуются учитывать состояния всех позиций, которые входят в конструкцию конфликта. Некоторые алгоритмы из области анализа процессов позволяют восстанавливать конструкции конфликта, и это необходимо учитывать при создании моделей

¹ В соответствии с ранее сделанными замечаниями, предполагаем, что сеть принадлежит классу Sound Workflow Nets, следовательно является безопасной.

² Вероятность относительно срабатывания взаимоисключающих переходов.

³ Поскольку в других позициях конструкции конфликта может не быть жетонов.

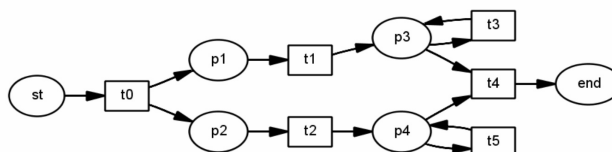


Рис. 3. Сеть Петри с конфликтом

процессов для прогнозирования по журналам событий.

Второй недостаток алгоритма Розинат связан с неполным учетом скрытых переходов. Как уже упоминалось выше, алгоритм Розинат анализирует скрытые переходы в последователях позиции только до встречи конструкции объединения. Это значит, что в приведенном на рис. 2 примере мы потеряем ситуации, когда жетон переходит из позиции $p1$ в $p8$ и $p9$.

Задача данной работы состоит в улучшении подхода Розинат по выявлению развилок процесса для сетей Петри, восстановленных из журналов событий, которое позволило бы избежать рассмотренных недостатков.

Используемые сокращения. ЭП – экземпляр процесса. Это структурная единица информации логов, содержащая в себе последовательность событий для конкретного исполнения процесса. Журнал событий или лог состоит из комплекта ЭП.

СП – сеть Петри. Основные использованные понятия теории сетей Петри взяты из работы Дж. Питерсона [5].

ПЗП – последовательность запуска переходов в СП. Важное отличие ПЗП от ЭП заключается в том, что ЭП содержит последовательность событий в реальном логге информационной системы, в то время как ПЗП – это последовательность срабатывания переходов для модели процесса. Стоит также отметить, что модель процесса может содержать скрытые переходы, в то время как в реальном логге соответствующие им события отсутствуют.

Идентификация развилок при наличии конструкций конфликта. На рис. 4 приведен пример конструкции, обобщающей рассматриваемую проблему. Применение алгоритма Розинат к сети с рис. 4 позволит обнаружить три развилки: $(t1, t2, t3)$, $(t2, t3, t4)$ и $(t3, t4, t5)$. В действительности выбор не осуществляется в соответствии с этими развилками, поскольку он должен учитывать, какие переходы разрешены в конкретный момент.

В данной статье для выявления развилок в сетях Петри с конфликтами предлагаем рассматри-

вать различные маркировки в рамках конфликта, когда разрешено более одного перехода. Это является обоснованным, поскольку каждая маркировка задает уникальную ситуацию, в рамках которой относительные вероятности срабатывания для переходов могут отличаться от вероятностей срабатывания тех же переходов в других ситуациях (при других маркировках).

В соответствии с этим множество развилок для конструкции с рис. 4 будут выглядеть следующим образом: $((p1, p2), (t1, t2))$, $((p2, p3), (t4, t5))$, $((p1, p3), (t1, t5))$, $((p1, p2, p3), (t1, t2, t3, t4, t5))$, причем они существуют не одновременно, а в зависимости от текущей маркировки. В подходе Розинат развилки определяются локально, в рамках одной позиции СП, в то время как более сложные ситуации, подобные рассмотренной выше, требуют учета суперпозиции состояний нескольких позиций, если они объединены конструкцией конфликта.

Рассмотрим матрицу D^- для конструкции с рис. 4, где в столбцах будут расположены позиции сети Петри для конструкции конфликта, а в строках – соответствующие переходы.

Замечание 1. Переход t входит в развилку для некоторой маркировки M конструкции конфликта тогда и только тогда, когда в строке матрицы D^- , соответствующей t , в столбцах, соответствующих позициям, не входящим в M , находятся нули. При этом число переходов в развилке должно быть больше одного.

В соответствии с этими замечаниями, предложим схему алгоритма поиска развилок для СП, в

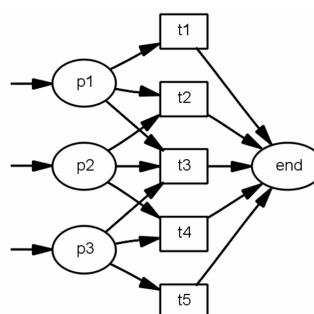


Рис. 4. Пример конструкции синхронизации-разделения

Таблица 1

Матрица D^- для конструкции с рис. 4

	p1	p2	p3
t1	1	0	0
t2	1	1	0
t3	1	1	1
t4	0	1	1
t5	0	0	1

которых присутствуют конструкции конфликта.

1. Поиск конструкций конфликта в СП.

2. Для каждой конструкции, найденной в 1, построение матрицы D^- для всех входящих в конструкцию переходов и позиций.

3. Для каждой матрицы D^- из 2 построение множества всех возможных маркировок для позиций, входящих в нее, предполагая, что сеть Петри безопасная.

4. Для каждой маркировки из 3 и каждого перехода, входящего в D^- , определение, принадлежит ли переход развилке в соответствии с замечанием 1.

5. Из множества всех полученных развилочек удаление таких, в которых число переходов меньше двух.

Идентификация развилочек со скрытыми переходами. В работе Розинат утверждается, что нельзя «заглядывать» (trace) за скрытые переходы в том случае, если за ними следует конструкция объединения. Для пояснения этого рассмотрим четыре ситуации на рис. 5 а–г.

В первом случае (5 а) проблем с определением сработавшего скрытого перехода не возникает, поскольку появление в логе записи о событии tf при отсутствии записей о $t1$ и $t2$ будет однозначно указывать на то, что сработал именно

скрытый переход $tx1$. Вторая (5 б) и третья (5 г) конструкции сложнее и похожи друг на друга. Для них в рамках чтения только одного следующего элемента лога нельзя гарантированно определить, какой из скрытых переходов сработал. Однако последующее движение по логу позволяет это сделать. Например, если в логе встретится только запись о событии tf , то это будет указывать на то, что в качестве скрытого перехода был выбран $tx1$. Для ситуации с рис. 5 г характерно то, что никакая информация из лога для конкретного ЭП не позволит однозначно определить, какой из скрытых переходов СП сработал. Это порождает неоднозначность, выражающуюся в наличии нескольких равноправных ПЗП в сети Петри для одного и того же экземпляра процесса из лога. Именно последнее наблюдение вынудило Розинат отказаться от анализа последователей скрытых переходов после конструкции объединения. Однако случаи, подобные изображенным на рис. 5 б и в, не порождают неоднозначности, т. е. в некоторых ситуациях можно определить сработавший скрытый переход даже если за ним идет конструкция объединения.

Предложим схему обработки скрытых переходов применительно к развилкам в СП. На первом этапе для каждого скрытого перехода t_i , входящего хотя бы в одну развилку, необходимо построить множество T_i^e явных переходов, которые могут непосредственно последовать в том случае, если на развилке будет выбран t_i . Назовем это множество *множеством последователей*. Наличие множества последователей для каждого скрытого перехода позволяет при построении ПЗП по логу в каждой ситуации, когда скрытый переход разрешен, производить оценку того, к чему приведет срабатывание скрытого перехода и как его

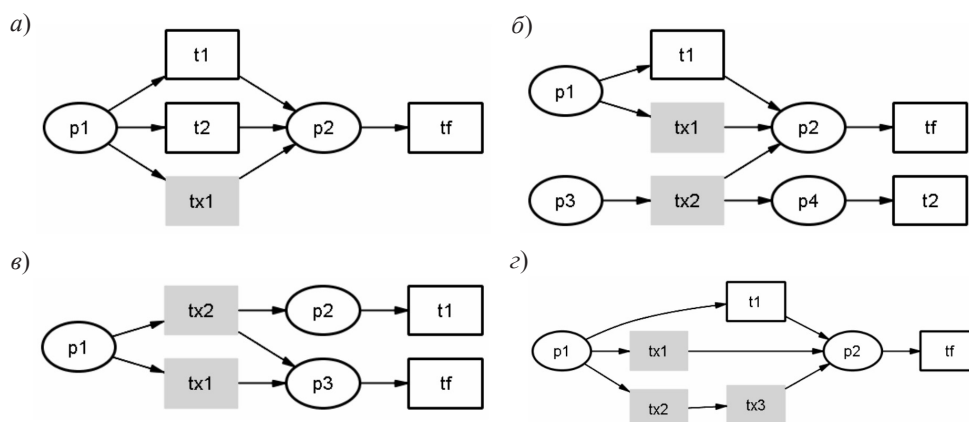


Рис. 5. Конструкции со скрытыми переходами

срабатывание соотносится со следующим событием в логе. После построения множеств последователей для всех входящих в развилки скрытых переходов можно начинать построение ПЗП для конкретного ЭП по следующему алгоритму.

1. Задать начальную маркировку M_0 , задать пустую ПЗП σ .

2. Для текущей маркировки M_{0x} определить множество разрешенных переходов T_A .

3. Получить следующее событие e ЭП из лога. Если дошли до конца лога, то закончить и вернуть сообщение: «Конец лога».

4. Если в T_A есть скрытые переходы, перейти к 6.

5. Если в T_A содержится переход t , соответствующий событию e , то $\sigma = \sigma \cup t$, $M_{0x} = (M_{0x} \setminus \bullet t) \cup t \bullet$, прибавить к индексу читаемого символа в логе единицу и перейти к пункту 2, в противном случае закончить, вернуть сообщение об ошибке: «Лог не соответствует СП».

6. Построить комплект $B(T)$ по следующему правилу: элементами $B(T)$ становятся все явные переходы T_A и все элементы множества последователей T_{tx}^e для каждого скрытого перехода t_x из T_A .

7. Если существует такой переход t , который соответствует событию из лога e и $B(t) = 1$, то, если $t \in T_A$ (t является явным): $\sigma = \sigma \cup t$, $M_{0x} = (M_{0x} \setminus \bullet t) \cup t \bullet$, прибавить к индексу читаемого символа в логе единицу и перейти к пункту 2; если $t \notin T_A$ (t находится в множестве последователей скрытого перехода): для скрытого перехода t_x у которого $t \in T_{tx}^e$: $\sigma = \sigma \cup t_x$, $M_{0x} = (M_{0x} \setminus \bullet t_x) \cup t_x \bullet$, *не прибавлять* к индексу читаемого символа в логе единицу и перейти к пункту 2;

8. Если существует такой переход t , который соответствует событию из лога e и $B(t) = 0$, то закончить, выдать сообщение об ошибке: «Лог не

соответствует СП».

9. Если существует такой переход t , который соответствует событию из лога e и $B(t) > 0$, то построить множество T_U по следующей схеме: если $t \in T_A$ (t является явным): $T_U = T_U \cup t$; если $t \notin T_A$ (t находится в множестве последователей скрытого перехода), то для скрытого перехода t_x у которого $t \in T_{tx}^e$: $T_U = T_U \cup t_x$.

10. Выполнить рассматриваемый алгоритм $k = |T_U|$ раз. Выполнение каждого такого экземпляра алгоритма осуществляется независимо от других и от породившего их алгоритма по следующей схеме: для каждого $t_U \in T_U$ начать алгоритм с пункта 2; в качестве текущей маркировки задать маркировку $M_{0x} = (M_{0x} \setminus \bullet t_U) \cup t_U \bullet$; если t_U явный, то прибавить к индексу читаемого символа в логе единицу, в противном случае не прибавлять; положить текущую ПЗП $\sigma = \sigma \cup t_x$.

11. Число завершений с сообщением «Конец лога» обозначим Z_{done} . Если $Z_{done} = 0$, то вернуть сообщение об ошибке: «Лог не соответствует СП». Если $Z_{done} = 1$, то сделать σ равной ПЗП, выработанной экземпляром алгоритма, вернувшим сообщение «Конец лога», и вернуть сообщение «Конец лога». Если $Z_{done} > 1$, то выбрать наименьшую по длине ПЗП из созданных экземплярами алгоритма, вернувшими сообщение «Конец лога» и присвоить ее переменной σ , вернуть сообщение «Конец лога».

В результате работы алгоритма выданное им сообщение информирует о возможности или невозможности построить ПЗП для ЭП и в случае возможности в σ будет храниться искомая ПЗП. Если возникают ситуации, подобные изображенной на рис. 5 з, в текущем описании алгоритм выбирает наименьшую по длине ПЗП из получившихся и выдает ее в качестве искомой.

Ограничение на входные данные для описанных алгоритмов. Алгоритм обнаружения

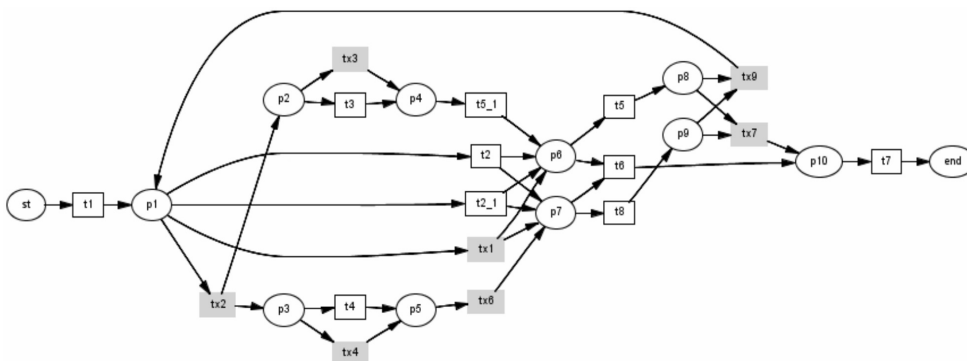


Рис. 6. Сеть Петри с конструкциями конфликта и скрытыми переходами

Таблица 2

Сравнение результатов алгоритмов Process Fork и Розинат

	Алгоритм Process fork	Алгоритм Розинат
Развилки СП	[p3]: t4, tx4 [p7, p6]: t6, t5, t8 [p1]: t2_1, t2, tx1, tx2 [p2]: t3, tx3 [p9, p8]: tx9, tx7	[p1]: t2_1, t2 [p6]: t6, t5 [p7]: t8, t6

развилок в конструкциях конфликта может быть применен только к безопасным сетям Петри. Также описанный алгоритм может быть неприменим, когда число позиций в ситуации конфликта слишком велико, поскольку число различных маркировок, для которых производится поиск развилки, растет по степенному закону 2^N , где N – число позиций в ситуации конфликта. Оба алгоритма применимы к сетям Петри, относящимся к классу Sound Workflow Nets [4]. Журнал событий, который требуется проиграть по получившейся модели, не должен содержать событий, для которых отсутствуют переходы в получившейся сети Петри.

Программная реализация алгоритмов. Предложенные в данной статье алгоритмы реализованы авторами в программном средстве Process Fork. Process Fork разработан на языке Java. Исполняемый модуль Process Fork можно найти в архиве [7]. В качестве вспомогательных использовались библиотеки из программного средства с открытым исходным кодом Prom 5. Process Fork позволяет загружать модель процесса в нотации сети Петри в формате PNML [9], строить множества развилок процесса как с помощью представленного в этой

статье алгоритма, так и с использованием алгоритма Розинат, а также строить ПЗП для логов, представленных в формате MXML [10], или для отдельных последовательностей событий, редактор которых присутствует в Process Fork. Общее руководство по эксплуатации и информация об ограничениях для входных данных находятся в архиве с программой в файле manual.doc [7].

Пример работы алгоритма. Для демонстрации работы алгоритма проанализирована СП, представленная на рис. 6.

В этой сети присутствуют как скрытые переходы (все переходы, выделенные серым фоном, с префиксом «tx»), так и конструкции конфликта ((p6, p7) и (p8, p9)). Результаты работы алгоритма Process Fork и алгоритма Розинат для сети с рис. 6 представлены в табл. 2.

Также для синтетического ЭП вида (t1, t8, t5, t8, t5_1, t5, t7) с использованием алгоритма Process Fork построена ПЗП, имеющая следующий вид: (t1, tx1, t8, t5, tx9, tx2, tx4, tx6, t8, tx3, t5_1, t5, tx7, t7). Это является точным и однозначным отображением событий ЭП в структуре заданной СП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ходырев, И.А. Прогнозирование показателей организации с использованием журналов событий [Текст] / И.А. Ходырев, Ю.С. Татаринов // Известия СПбГЭТУ (ЛЭТИ). –2011. –№.5. –С. 53–58.
2. Rozinat, A.S. Process Mining Conformance and Extension [Text] / A. Rozinat // PhD Thesis. –The Netherlands, Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2010.
3. Rozinat, A.S. Information Systems [Text] / A. Rozinat, R.S. Mans, M. Song [et al.] –2009. –Vol. 34. –P. 305–327.
4. van der Aalst, W.M.P. Workflow Mining: Which Processes can be Rediscovered? [Text] / W.M.P. van der Aalst, A.J.M.M. Weijters, L. Maruster // BETA Working Paper Series. –Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2002. –P. 74.
5. Питерсон, Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем [Текст] / Дж. Питерсон. –М.: Мир, 1984.
6. de Medeiros, A.K.A. Genetic Process Mining [Text] / A.K.A. de Medeiros // PhD Thesis. –The Netherlands, Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2006.
7. [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://dl.dropbox.com/u/11080654/KIV_PUBLIC/PROCESS_FORK_ARCHIVE.zip
8. van der Aalst, W.M.P. Business Process Mining: An Industrial Application [Text] / W.M.P. van der Aalst, H.A. Reijers, A.J.M.M. Weijters [et al.] // Information Systems. –Vol 32(1). –P. 713–732.
9. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://pnml.org>
10. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.processmining.org/logs/mxml>

ЭНТРОПИЙНЫЙ ПОДХОД В ЗАДАЧЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СИСТЕМНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛИ КОМПЕТЕНЦИИ

В настоящее время в систему высшего образования России внедрены федеральные государственные образовательные стандарты (ФГОС) на основе компетентностного подхода. Это связано с процессами сближения и «гармонизации» систем образования различных стран, вследствие чего образовательная политика и практика работы всех высших учебных заведений перестраивается в соответствии с компетентностным подходом. В основе этих изменений – идея о переходе к оценке уровня подготовки выпускника вуза в форме измерения его компетенций. Обилие работ, посвященных проблемам перехода российского образования на компетентностный подход, носит в основном, теоретико-методологический характер, переход от теории к практике в большинстве работ явно не прослеживается. Однако в требованиях к освоению основной образовательной программы содержится пункт о необходимости оценки у выпускников вузов формируемых компетенций и наличие процедур, позволяющих осуществлять количественные измерения уровня формирования компетенций. В связи с чем проблема измерения уровня формирования компетенции в вузе является актуальной.

Прежде чем перейти к основной части статьи, рассмотрим понятие *компетенция*. В огромном количестве существующих определений понятия *компетенция* можно найти общие элементы, выявляющие категориальную суть данного концепта. Так, компетенция интерпретируется как

предметная область, о которой индивид хорошо осведомлен;

интегративная совокупность характеристик (знания, умения, навыки, способности, мотивы, убеждения, ценности), обеспечивающая выполнение профессиональной деятельности на высоком

уровне и достижение определенного результата; интегрированная характеристика качества подготовки выпускника, категория результата образования [1].

Таким образом, общим для всех определений компетенции является понимание ее как свойства личности, потенциальной способности индивида справляться с различными задачами, как совокупность знаний, умений и навыков, необходимых для осуществления конкретной профессиональной деятельности. Итак, концепт «компетенция» следует воспринимать комплексно, как структуру, слагаемую из различных частей.

Понятно, что приобретение компетенций – процесс, сопровождающий профессиональную деятельность, поэтому имеет смысл рассматривать жизненный цикл компетенции. Поскольку нас интересует процесс формирования компетенции студента вуза, то в данной статье будем рассматривать жизненный цикл компетенции (ЖЦК) в период обучения в вузе (рис. 1).

ЖЦК состоит из трех этапов (формирование, совершенствование и применение), каждый из которых формируется посредством изучения учебных дисциплин. Таким образом, дисциплины являются составляющими компетенции, которые вносят свой вклад в формирование компетенции. Очевидно, что влияние дисциплин будет неодинаковым. В целях ответа на вопрос о степени влияния каждой дисциплины на формирование компетенции необходимо построить модель компетенции.

Формально компетенцию можно представить в виде ориентированного взвешенного графа $G = \langle X, R \rangle$, где $X = \langle K, D, d \rangle$ – множество вершин графа (K – компетенция, D – дисциплины, непосредственно влияющие на компетенцию,

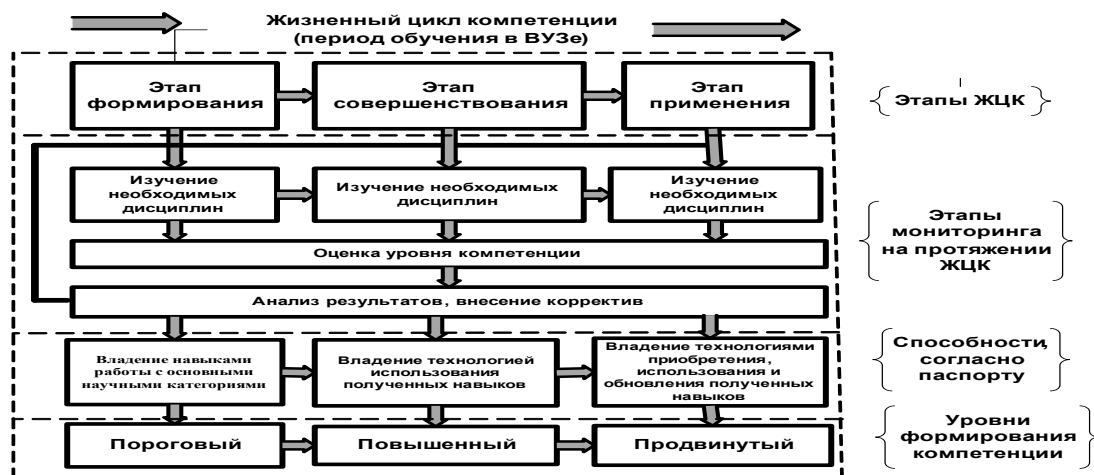


Рис. 1. Жизненный цикл компетенции

d – дисциплины, косвенно влияющие на компетенцию); R – множество ребер, соединяющих дисциплины с компетенцией и дисциплины между собой, причем каждое ребро будет характеризоваться весом влияния [2] (рис. 2).

Процесс формирования компетенции можно рассматривать как систему. В системе формирования компетенции: элемент системы – дисциплина; вход элемента – навыки, приобретенные посредством ранее изученных дисциплин, от которых данная дисциплина находится в зависимости; выход элемента – новый набор навыков, приобретенных после изучения данной дисциплины.

Под состоянием элементов системы будем понимать показатель участия дисциплин в форми-

ровании компетенции как непосредственно, так и через другие дисциплины, являющиеся также элементами системы. Под состоянием системы будем понимать уровень формирования компетенции.

Рассмотрим систему формирования компетенции в разрезе информационного подхода. Любые системы, из каких бы элементов они не состояли, и что бы ни являлось их конечной целью, по существу являются системами передачи и переработки информации. Поэтому к системе формирования компетенции применимы методы информационного анализа цепей.

Пусть формирование компетенции – есть система передачи и переработки информации. В

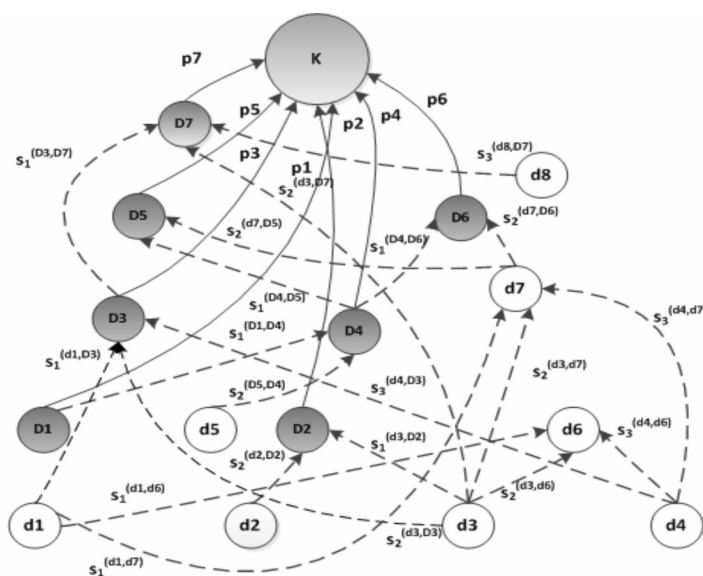


Рис. 2. Графовая модель компетенции



системе формирования компетенции: источник информации – дисциплина, от которой зависит формирование компетенции; приемник информации – компетенция (или дисциплина), которая зависит от изученных дисциплин; информационный канал – связь дисциплины с компетенцией или дисциплины с дисциплиной.

В целях исследования системы формирования компетенции выделим системные характеристики модели компетенции: целостность компетенции, степень участия каждой дисциплины в системе формирования компетенции

Целостность, позволяет определить, насколько весь пакет дисциплин формирует компетенцию. Степень участия дисциплины в формировании компетенции позволит оценить степень значимости каждой дисциплины для всей системы формирования компетенции в целом, поскольку одна и та же дисциплина может влиять на компетенцию как непосредственно, так и через другие дисциплины. Очевидно, что с увеличением цепочек влияния от одной дисциплины к другим значимость дисциплины будет возрастать.

Исследование системы формирования компетенции на целостность и определение степени важности каждого элемента может быть осуществлено, в частности, на основе информационного подхода [3]. Интенсивность, т. е. количество информации, которую вкладывает дисциплина в компетенцию за период ее формирования, можно рассматривать как количественную меру взаимодействия дисциплин друг с другом в системе формирования компетенции.

Пусть система формирования компетенции состоит из n учебных дисциплин, каждая из которых может принимать m состояний.

Пусть H_i – энтропия влияния i -й дисциплины на формирование компетенции; $i \in [1, n]$, n – количество дисциплин, формирующих компетенцию; p_j – вероятность j -го состояния системы формирования компетенции (весовой коэффициент влияния дисциплины на формирование компетенции). Тогда степень воздействия всех дисциплин, формирующих компетенцию, определяется выражением $H = \sum_{j=1}^m p_j \log_2 p_j$, m – количество дисциплин. Пусть H_0 – сумма влияний всех дисциплин, формирующих компетенцию $H_0 = \sum_i H_i$.

Тогда сумма влияний всех дисциплин, формирующих компетенцию, будет равна степени

воздействия всех дисциплин, формирующих компетенцию, в случае если дисциплины не зависят друг от друга.

Очевидно, что в системе формирования компетенции $H_0 \geq H$. Пусть $H_{вз}$ – степень взаимного влияния элементов системы.

Следовательно, если обозначить $H_{вз} = \sum_i H_i - H$, то чем больше величина взаимного влияния дисциплин на формирование компетенции, тем в большей степени дисциплины взаимосвязаны и их совокупность обладает свойством системной целостности.

В данном случае характеристика системной целостности необходима для того, чтобы понять, насколько весь пакет дисциплин, определенных в модели компетенции, участвует в ее формировании.

Для оценки степени целостности системы удобнее использовать относительную оценку:

$$\alpha = \frac{\sum_i H_i - H}{\sum_i H_i},$$

поскольку для систем с различным значением H_0 сопоставление взаимных содержаний неэффективно. Очевидно, что $0 \leq \alpha \leq 1$, причем, чем ближе значение α к единице, тем в большей степени дисциплины участвуют в формировании компетенции. Величина α описывает среднее по всем дисциплинам значение возможностей дисциплины для формирования компетенции, но не позволяет дать оценку о значимости каждой отдельной дисциплины. Данную оценку можно оценить следующим образом.

Пусть H_{ij} – количество информации всей системы формирования компетенции, причем $p_i(j)$ – вероятность того, что i -я дисциплина влияет на формирование компетенции. Тогда величина $H = \sum_{j=1}^m p_j(j) \overline{H_{ij}}$ – среднее влияние элементов системы на компетенцию при условии, что влияние i -й дисциплины фиксировано.

Разность $H - H_i$ характеризует среднюю степень влияния состояний i -й дисциплины на возможные состояния компетенции.

Для оценки степени значимости i -й дисциплины для системы формирования компетенции можно использовать коэффициент $\beta_i = \frac{H - H_i}{H}$, причем если $\beta_i = 0$, то состояние системы формирования компетенции не зависит от i -й дис-

Оценка важности элементов системы, прямо и косвенно формирующих компетенцию

$\beta(\text{ПВ})$	$\beta(\text{АНП})$	$\beta(\text{ТиМП})$	$\beta(\text{ЭС})$	$\beta(\text{ОА})$	$\beta(\text{Ф})$	$\beta(\text{МА})$	$\beta(\text{АиГ})$
1	0,67	0,78	0,68	0,49	1	0,67	0,7

циплины; если $\beta_i = 1$, то каждому состоянию дисциплины соответствует ровно одно состояние системы формирования компетенции, т. е. состояния дисциплины жестко привязаны к состояниям системы.

Вычислим полученные характеристики для компетенции ПК 16 – «способности использовать инструментальные средства и системы для решения профессиональных задач», содержащейся в ФГОС направления подготовки «Информационная безопасность». Приведем перечень дисциплин прямо и косвенно формирующих компетенцию ПК 16. Прямое влияние: параллельные вычисления (ПВ), алгоритмы направленного перебора (АНП), технологии и методы программирования (ТиМП), электроника и схемотехника (ЭС), основы алгоритмизации (ОА). Косвенное влияние: математический анализ (МА), алгебра и геометрия (АиГ), физика (Ф).

Рассчитаем характеристики, необходимые для определения степени целостности данной компетенции $H = 2,76$, $H_1 = 2,25$, $H_2 = 2,06$, $H_4 = 12,58$, $H_0 = 19,53$, $H_1 = 2,25$, $H_{\text{вз}} = 16,77$, $\alpha = 0,86$.

Вычислим коэффициенты важности каждой из дисциплин (табл.).

Согласно полученным данным коэффициент степени целостности компетенции достигает 86 %, наибольшее влияние на компетенцию ПК 16 имеют следующие дисциплины: параллельные вычисления, физика, технологии и методы программирования; наименьшее влияние – основы алгоритмизации.

Таким образом, применяя информационный подход в задаче оценки степени влияния дисциплины на формирование компетенции, получаем меру влияния всех дисциплин, принимавших какое-либо участие в формировании компетенции. Данная характеристика необходима для задачи оценки компетенции специалиста, она позволит выделить наиболее важные дисциплины. Получение перечня наиболее значимых дисциплин системы формирования компетенция является важной характеристикой для системы поддержки принятия решений в задаче управления процессом формирования компетенции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гончарова, Н.Л. Категории «компетентность» и «компетенция» в современной образовательной парадигме [Текст] / Н.Л. Гончарова // Сб. научных трудов СевКавГТУ. –2007. –№ 5.
2. Сибикина, И.В. Процедура оценки компетентности студентов вуза, обучающихся по направлению «Информационная безопасность» [Текст] / И.В. Си-

- бикина // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. –2011. –№ 1. –С. 200–205.
3. Денисов, А.А. Теория больших систем управления: Учеб. пособие для вузов [Текст] / А.А. Денисов, Д.Н. Колесников. –Л.: Энергоиздат, 1982. –288 с.



АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

С увеличением промышленного производства и численности населения планеты вопросы рационального природопользования приобретают особую актуальность. Решение задачи ограничения антропогенного воздействия на окружающую среду (ОС) на фоне роста потребления природных ресурсов является общемировой проблемой.

В области охраны окружающей среды эффективные системы информационного управления – редкое исключение, что, на наш взгляд, обусловлено недостаточной проработанностью вопросов, находящихся на стыке экологии, географии, биологии, информатики, экономики и медицины.

В сложных социальных эколого-экономических системах, которыми являются современные урбанизированные территории, эффективные управленческие решения всегда должны основываться на анализе системных связей, учете закономерностей, визуализации и обработке предметной информации.

В рамках проведенных исследований разработана методология управления качеством окружающей среды, состоящая из методик оценки влияния антропогенного воздействия на природную среду урбанизированных территорий, научно-методических принципов создания и использования средств поддержки принятия решений и методики расчета эколого-экономической эффективности природоохранных мероприятий. При этом под качеством ОС подразумевается экологическое состояние основных природных компонентов, оказывающих воздействие на человека, которое может оцениваться количественно и интегрально.

Для количественной оценки антропогенного воздействия на окружающую среду предложено учитывать состояние атмосферного воздуха, почвенного покрова, водных объектов, зеленых насаждений, уровень шума и вибрации, радиационное загрязнение и накопление отходов.

Зонирование урбанизированных территорий по степени загрязнения атмосферного воздуха для последующей интегральной оценки

проводится в среде ГИС на основании анализа распределения значений показателя P (суммарного загрязнения воздуха комплексом вредных химических веществ). Для автоматизации данного этапа используется специально разработанное программное расширение к GIS ArcView. В соответствии с получаемыми расчетными данными в существующих границах объекта определяются зоны с допустимым, слабым, умеренным, сильным и опасным уровнями загрязнения атмосферного воздуха. Учитывая специфику данного компонента природной среды, следует отметить, что наличие перечисленных зон носит вероятностный характер.

Для построения балльной оценки загрязнения почв рассчитывается вспомогательное поле с использованием формулы

$$S = i - 1 + \frac{(Z_c - Z_{c,i,\min})}{Z_{c,i,\max} - Z_{c,i,\min}}, \quad (1)$$

где i – номер диапазона изменения суммарного показателя загрязнения почвы Z_c ; $Z_{c,i,\min}$, $Z_{c,i,\max}$ – соответственно верхняя и нижняя границы диапазона значений показателя Z_c для i -й градации.

Затем с помощью средств пространственно-статистического анализа определяется среднее значение балльной оценки для ландшафтно-экологического подрайона.

Чтобы в некоторой степени учесть при комплексной оценке другие аспекты загрязнения почвенного покрова, зависимость его последствий от использования и расположения территорий, введен дополнительный балл $S_{м.и}$. В результате балльная оценка загрязнения почв выражается как $S = 0,8S(Z_c) + S_{м.и}$, где $S(Z_c)$ – балльная оценка суммарного загрязнения почв тяжелыми металлами; 0,8 – весовой коэффициент этой оценки, введенный для сохранения пятибалльной шкалы; $S_{м.и}$ – введен для учета выполнения на территории ландшафтно-экологических подрайонов ограничений на концентрацию тяжелых металлов, зависящих от местоположения и вида использования территорий и применяемых в зарубежной практике. Пример таких ограничений, рекомендуемых

для использования в Российской Федерации, приведен в СП 11-102-97 (РФ). Значения $S_{м,и}$ определены как отношение количества загрязнителей, по которым превышены ограничения, к общему количеству учитываемых поллютантов.

В качестве исходных данных для оценки экологического состояния поверхностных и подземных вод используются материалы проектов водоохранных зон. К основным факторам, оказывающим наибольшее воздействие на водные ресурсы, относятся: степень защищенности грунтовых вод; зависимость уровня антропогенной нагрузки на подземные воды от функционального использования территории; объем выноса загрязняющих веществ с территории города в поверхностные воды; наличие аномального загрязнения почвенного покрова тяжелыми металлами в водоохранных зонах и зонах с низкой степенью защищенности грунтовых вод; степень концентрации по зонам магистральных линий хозяйственно-бытовой канализации; степень концентрации по зонам объектов хранения нефтепродуктов.

При балльной оценке степени защищенности грунтовых вод от загрязнения используются следующие значения: условно защищенные – 0,5 балла; слабо защищенные – 1,5; незащищенные от загрязнения – 2,5. Для оценки зависимости уровня антропогенной нагрузки на подземные воды от функционального использования территорий используются следующие значения: лесные массивы – 0 баллов; сельскохозяйственные земли – 1; усадебная и дачная застройка – 1,5; животноводческие комплексы – 2. Для прочих видов использования территорий устанавливается оценка 0,5 балла.

Бесспорной является важность зеленых насаждений для повышения качества экологического состояния урбанизированных территорий в результате выполнения водоохранных, почвозащитных и saniрующих функций. Основными этапами расчета показателей обеспеченности населения ландшафтно-рекреационными территориями являются: определение местоположения, категории и площади объектов озеленения в структуре городской территории; определение коэффициентов рекреационной значимости объектов; определение численности населения в радиусе доступности к объектам озеленения по регламентируемым критериям доступности; расчет показателя обеспеченности населения ландшафтно-рекреационными территориями общего пользования городского и районного значе-

ния. При этом для итоговой интегральной оценки необходимо также учитывать показатели состояния и характеристики устойчивости насаждений лесного типа к рекреационным и техногенным нагрузкам.

Балльная оценка экологического состояния зеленых насаждений осуществляется по каждой характеристике: для устойчивости – высокой степени соответствует оценка в 1 балл, очень низкой и утраченной – 4 и 5 соответственно; обеспеченность в пределах 0–7,5 м² на человека оценивается в 3–4 балла, 15–30 м² – 1–2; хорошей качественной степени характеристики состояния ставится в соответствие оценка на уровне 1–2, напряженному состоянию – 3–4 балла.

Немаловажным фактором, оказывающим неблагоприятное воздействие на природную окружающую среду, является уровень шума и вибрации. В рамках выполненных исследований для областных центров Республики Беларусь проведено измерение уровня шума и вибрации от улично-дорожной сети, магистральных линий железных дорог, электроподстанций, а также внутриквартального шума в массивах многоквартирной жилой застройки и на территории лечебных учреждений со стационарами. Для определения расчетных уровней шума на всей территории города транспортный поток рассматривается как линейный протяженный источник шума, расположенный вдоль первой полосы движения и непрерывно излучающий звуковые волны. Для построения расчетного поля звукового давления на всей территории города, создаваемого линейными источниками, нами разработан и использован в среде ArcView GIS специальный программный модуль. Для построения поля балльной оценки территории города по уровню шума использовалась кусочно-линейная интерполяция данных

Балльная оценка уровня шума

Диапазон уровней эквивалентного звукового давления, дБА	Оценка, балл
менее 45	0–1
45–55	1–2
55–60	2–3
60–70	3–4
70 и более	4–5



электронной карты акустического загрязнения в соответствии с таблицей.

Оценивая следующий немаловажный фактор, формирующий экологическое состояние окружающей среды – радиационное загрязнение, необходимо отметить, что применительно к исследованным объектам учитывалось среднегодовое значение без дифференциации на районы в связи с отсутствием существенных колебаний фона. При этом балльная оценка при мощности дозы гамма излучения ≤ 20 мкР/ч (0,2 мкЗв/ч) составляла 1 балл, 20–60 мкР/ч – 2, 60–120 мкР/ч – 3, 120–240 мкР/ч – 4, более 240 – 5 баллов.

При исследовании влияния накоплений отходов на экологическое состояние урбанизированных территорий балльная оценка функционально-ландшафтных зон проводится в соответствии с данными об объемах образования, использования, обезвреживания, хранения и захоронения отходов по данным форм государственной статистической отчетности с учетом класса опасности. При этом учитывается фактическое количество оставшихся на территории отходов на конец отчетного периода.

В общем виде, без описания обратных связей, алгоритм интегральной оценки экологического состояния урбанизированных территорий может быть представлен следующими этапами: функционально-экологическое зонирование территории, балльная оценка состояния отдельных компонентов окружающей среды, интегрированная комплексная оценка. При этом существенное значение имеет процесс взвешивания учитываемых параметров и их учет в итоговой интегральной оценке.

Традиционным способом сведения (свертки) результатов оценки экологического состояния компонентов окружающей среды является вычисление их арифметического среднего. Однако проведенные исследования свидетельствуют о том, что такой подход не способствует ранжированию городских территорий по степени напряженности экологических проблем, а скорее способствует нивелированию различий между отдельными зонами.

Для решения описанной проблемы предлагается комбинированный способ свертки, в результате которого производится усреднение частных оценок по трем доминирующим компонентам окружающей среды, выбор которых для каждой функционально-ландшафтной зоны производит-

ся отдельно. Один из трех доминирующих компонентов выбирается в зависимости от основного вида использования территорий. Для зон с преобладанием многоквартирной жилой и общественной застройки и для промышленных зон в качестве такого основного компонента обязательно учитывается атмосферный воздух, для зон с преобладанием усадебной застройки и для пойменных территорий – почвенный покров, для зон с доминированием зеленых насаждений общего пользования и лесных массивов – растительный покров. В качестве двух других из оставшихся компонентов для усреднения выбираются те, по которым оценка напряженности данной зоны дала наибольшие баллы. Определение доминирующих компонентов при таком подходе позволяет также конкретизировать проблемы, связанные с ухудшением экологического состояния по данной совокупности факторов.

При использовании описанной методики для г. Могилева из 55 функционально-ландшафтных зон, находящихся полностью или большей частью в пределах существующей городской черты, напряженность экологической ситуации в 6 зонах оценена как умеренно опасная, в 40 зонах – как средняя и в 9 – как слабая (см. рисунок) [1].

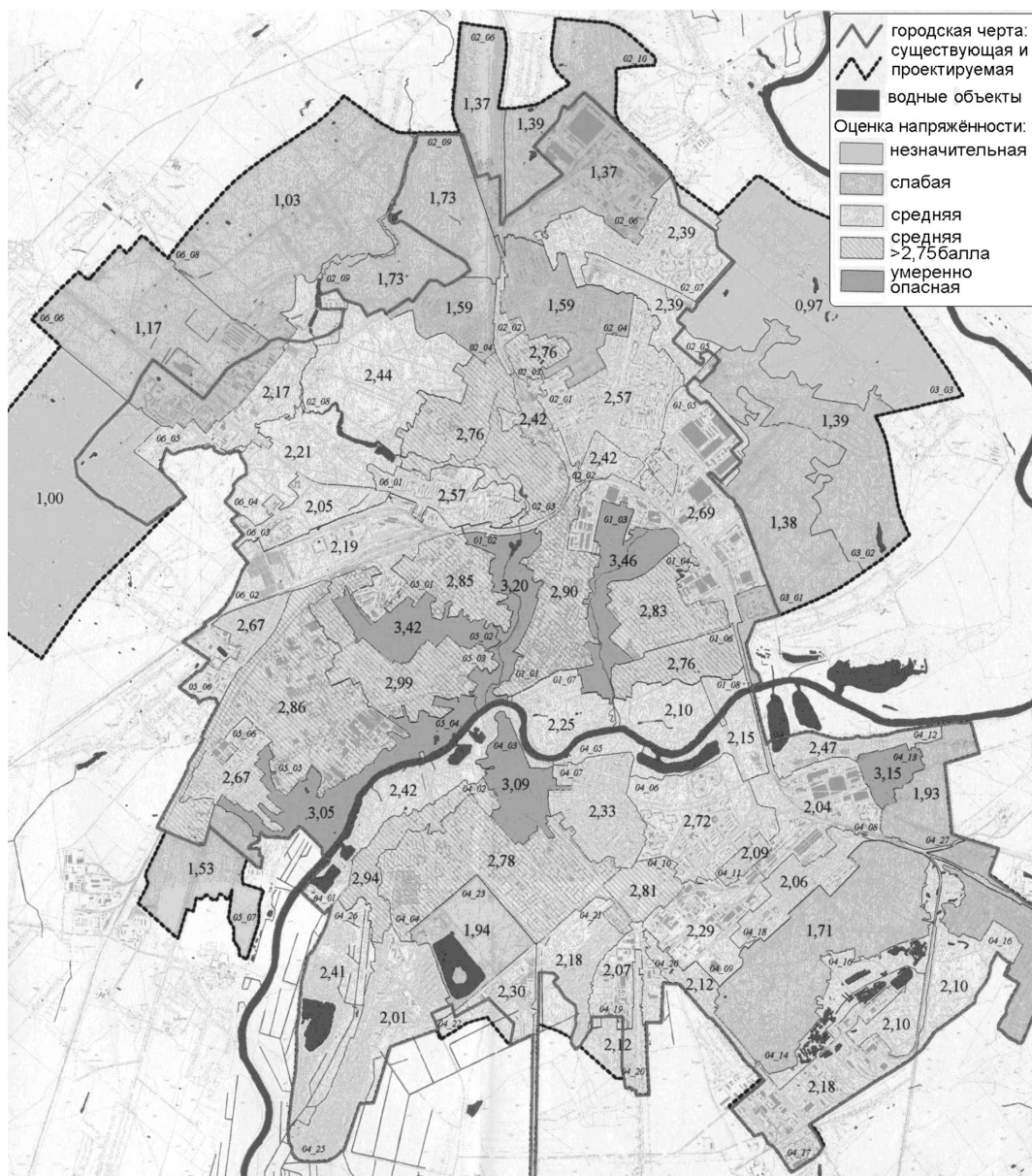
После выделения зон экологической напряженности необходимо разработать адекватные природоохранные мероприятия, позволяющие улучшить качество окружающей среды. В условиях ограниченности финансовых средств актуальной на данном этапе представляется задача выбора таких мер, эффект от которых будет максимален при минимальных затратах.

Для решения поставленной задачи предлагается использовать генетические алгоритмы (ГА). Отмечая, что ГА позволяют осуществлять поиск оптимальных решений для целого ряда практических задач, также заметим, что широта сферы применения ГА обусловлена, прежде всего, универсальностью, а также способностью одновременно оптимизировать решение задачи по нескольким критериям.

Анализ результатов использования ГА позволяет выделить следующие условия, при выполнении которых задача решается эффективно:

большое пространство поиска, ландшафт которого является негладким (содержит несколько экстремумов);

сложно формализуемая функция степени оценки качества решения;



Интегральная оценка напряженности экологического состояния территории г. Могилева

многокритериальность поиска;

поиск по заданным критериям приемлемого, а не единственного оптимального решения [2].

Очевидно, что задача оптимизации качества городской окружающей среды соответствует всем перечисленным условиям и, таким образом, может быть эффективно решена с использованием ГА. Исходными данными при этом являются семь векторов ($A_i(a_1, a_2, \dots, a_n), i \in [1..7], n \leq 1000$), состоящих из балльных оценок функционально-ландшафтных зон урбанизированной территории, отражающих экологическое состояние атмосфер-

ного воздуха, почвенного покрова, водных ресурсов, лесных насаждений, уровень шума и вибрации, электромагнитных излучений и объемов накопления отходов. При этом стоимость приращения балльной оценки (улучшения качества) для различных показателей существенно отличается. Задача состоит в оптимизации расходов на природоохранные мероприятия, т. е. получении наиболее эффективного плана вложения финансовых средств с максимально возможной отдачей.

Предложенная выше методика позволяет получать сопоставимые балльные оценки для каж-



дого из семи параметров. При этом приращение величины оценки на Δa считается одинаково полезным для улучшения качества всех исследуемых сред, но имеет различную стоимость, обусловленную проведением соответствующих природоохранных мероприятий.

Стоимость изменения величин рассчитывается исходя из конкретных природоохранных мероприятий и выражается в рублях. Для некоторых параметров, например, таких, как уровень электромагнитных излучений, она может определяться экспертным путем.

Для решения поставленной задачи воспользуемся модификацией классического ГА – генетическим микроалгоритмом [3]. Он подразделяется на шесть шагов:

1. Сформировать популяцию с числом особей, равным семи. Можно либо случайным образом выбрать все семь хромосом, либо сохранить одну «хорошую» хромосому, полученную на предыдущих итерациях, и случайным образом «добрать» шесть остальных хромосом.

2. Рассчитать значение функции приспособленности хромосом в популяции и выбрать лучшую хромосому. Обозначить ее номером 7 и перенести в следующее поколение (элитарная стратегия).

3. Выбрать для репродукции остальные шесть хромосом на основе детерминированного метода турнирной селекции (наилучшая хромосома также участвует в соревновании за право включения ее копии в родительский пул). В ходе турнирной селекции хромосомы группируются случайным образом, при этом соседствующие пары соперничают за оставшиеся шесть мест. Следует обращать внимание на то, чтобы родительская пара не составлялась из двух копий одной и той же хромосомы.

4. Выполнить скрещивание с вероятностью 1, вероятность мутации принять равной нулю.

5. Проверить сходимость алгоритма (с использованием соответствующей меры сходимости генотипов или фенотипов). В случае обнаружения сходимости вернуться к шагу 1.

6. Перейти к шагу 2.

Заметим, что в генетическом микроалгоритме размер популяции предполагается небольшим и фиксированным. Применяется элитарная стратегия, которая предотвращает потерю «хороших» хромосом. Поскольку размер популяции невелик, то выполняется детерминированная селек-

ция. Скрещивание проводится с вероятностью 1. Мутация не требуется, т. к. достаточное разнообразие обеспечивается формированием новой популяции при каждом «рестарте» алгоритма, т. е. в случае перехода к шагу 1 при обнаружении сходимости. Процедура «старта» и «рестарта» алгоритма предназначена для предотвращения преждевременной сходимости, генетический микроалгоритм всегда ищет наилучшее решение. Главная цель его применения заключается в скорейшем нахождении оптимального (или почти оптимального) решения.

Следует подчеркнуть, что при выполнении генетического микроалгоритма разнообразие в популяции достигается благодаря процедуре рестарта алгоритма в случае обнаружения его сходимости. В этом случае мутация оказывается излишней.

При решении задач оптимизации качества ОС урбанизированных территорий с учетом предложенной методики количественной оценки антропогенного воздействия ширина поиска может находиться в пределах от 2 100 до 12 600 (при количестве зон 50–300, 5-балльной оценке каждого из семи компонентов и данных о стоимости улучшения состояния каждого компонента на 1 балл). При этом максимальная эффективность применения ГА составит 9,62 раз. В случае использования дробных балльных оценок, например чисел с одной значимой цифрой после запятой, ширина поиска увеличивается в 10 раз, а эффективность достигает значения 41,8.

Для проведения оценки эколого-экономической эффективности природоохранных мероприятий оправданным видится применение антропоцентрического подхода. Величина затрат в данном случае оценивается с учетом стоимости осуществления предлагаемых мер. С учетом приоритетности вклада загрязнения атмосферного воздуха в увеличение уровня заболеваемости детского населения (60–70 %), нами рассчитано уравнение линейной регрессии ($y = 343,1x - 31,8$), отражающее связь между индексом загрязнения атмосферы (ИЗА) и уровнем детской заболеваемости (всего на тысячу человек) [4].

После реализации системы мероприятий, направленных на снижение выбросов в атмосферный воздух исследуемого города, изменение значения показателя ИЗА на единицу может повлечь за собой снижение уровня детской заболеваемости на 311,3 случая на тысячу человек. Оценка ре-

зультата R (социальной выгоды) в данном случае представляет научный и практический интерес.

Укрупненная оценка результата R может осуществляться по следующей формуле:

$$R = R_{\text{с.с.в}} + R_{\text{с.с.д}} + R_{\text{з.л.в}} + R_{\text{з.л.д}}, \quad (2)$$

где $R_{\text{с.с.в}}$, $R_{\text{с.с.д}}$ – эффекты от сокращения выплат по больничным листам из-за загрязнения ОС для взрослых по причине собственной нетрудоспособности и уходом за детьми соответственно; $R_{\text{з.л.в}}$, $R_{\text{з.л.д}}$ – эффекты от сокращения затрат на лечение взрослых и детей в результате улучшения качества среды обитания.

С использованием данных официальной статистики проведена эмпирическая оценка слагаемых формулы (2):

$$R = c_1 N_{\text{вз}} k + c_2 n c_3 d k + c_1 N_{\text{ств}} f + c_2 N_{\text{стд}} f, \quad (3)$$

где c_1 – коэффициент, отражающий влияние факторов среды на здоровье взрослого населения; $N_{\text{вз}}$ – суммарная продолжительность нетрудоспособности согласно больничным листам в год (дней); k – величина средней заработной платы за один день, руб.; c_2 – величина снижения уровня детской заболеваемости в результате природоохранных мероприятий, случаи на тысячу человек; n – количество детей на исследуемой территории, тыс. чел.; c_3 – коэффициент, отражающий соотношение количества детей, для ухода за которыми при их заболевании взрослым выдается больничный отпуск к общему числу случаев детской заболеваемости; d – средняя продолжительность заболеваемости детей, дни; $N_{\text{ств}}$ – объем оказания медицинской помощи взрослым в стационарах, койко-дней; f – средняя стоимость одного дня стационарного лечения, руб./день; $N_{\text{стд}}$ – объем оказания медицинской помощи детям в стационарах, койко-дней на 1000 человек.

С учетом (2) и (3) для оценки экономической эффективности природоохранных мероприятий $\mathcal{E}_3$ предлагается следующая формула:

$$\mathcal{E}_3 = \frac{K_1 \cdot \mathcal{E}_{\text{соц}}}{K_2 \cdot \sum_{i=1}^m \mathcal{Z}_i} = \frac{K_1 (c_1 N_{\text{вз}} k + c_2 n c_3 d k + c_1 N_{\text{ств}} f + c_2 N_{\text{стд}} f)}{K \cdot \sum_{i=1}^m \mathcal{Z}_i}, \quad (4)$$

где $\mathcal{E}_{\text{соц}}$ – социальный эффект, полученный при реализации m природоохранных мероприятий, каждое из которых потребовало осуществление

затрат $\mathcal{Z}_i$ и стало причиной изменения значения комплексной оценки с K_1 на K_2 , где K_1 и K_2 – значения комплексной оценки до и после реализации природоохранных мероприятий соответственно.

В формуле (4) социальный эффект и сумма затрат рассчитываются в рублях, а результат представляет собой оценку эффективности для выбора оптимальных природоохранных мероприятий. При величине $\mathcal{E}_3$ менее либо равной единице предлагаемые мероприятия определяются как неэффективные, если значение $\mathcal{E}_3$ лежит в диапазоне от 1,1 до 1,2 – мероприятия низкоэффективные, (1,21–1,5) – эффективные, более 1,5 – высокоэффективные.

С учетом фактора времени формула (4) для определения экономической эффективности приобретает вид (5):

$$\mathcal{E}_{3t} = \left(\frac{K_1}{K_2} \right)^{\frac{1}{t}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^m \frac{\mathcal{E}_{\text{соц}-t}}{(1+r)^t}}{\sum_{i=1}^m \frac{\mathcal{Z}_t}{(1+r)^t}}, \quad (5)$$

где $\mathcal{E}_{3t}$ – экономическая эффективность с учетом фактора времени; t – время реализации природоохранного проекта; $\mathcal{E}_{\text{соц}-t}$ – социальный эффект t -го года; $\mathcal{Z}_t$ – затраты t -го года; r – коэффициент дисконтирования.

Следует отметить, что использование разработанных формул должно базироваться на актуальных и достоверных данных, отражающих как экологическое состояние исследуемых территорий, так и показатели здоровья населения. Сравнение экономической эффективности альтернативных природоохранных проектов, имеющих различные сроки реализации, должно проводиться по формуле (5). При этом в качестве степенного показателя для приращения комплексной оценки может также использоваться нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений природоохранного назначения E_n или ставка рефинансирования.

Предложенные методы расчета эколого-экономической эффективности природоохранных мероприятий на момент создания не имели аналогов в странах СНГ и ближнем зарубежье. Российскими учеными (Ю.А. Рахманиным и др. [5]) предложен частично схожий метод оценки ущерба от дополнительных случаев заболеваемости населения. Однако он базируется на трудно формализуемом популяционном риске и не всегда оправданных усреднениях объемов недополученной продукции.



Таким образом, предложенный алгоритм управления качеством окружающей среды, состоящий из методик оценки влияния антропогенного воздействия на природную среду урбанизированных территорий, научно-методических принципов создания и использования средств поддержки принятия решений и методики расчета эколого-экономической эффективности природоохранных мероприятий, основанных на анализе системных

связей, закономерностях функционирования сложных эколого-экономических систем, отличающихся интегральностью, составом учитываемых показателей, методами их расчета и свертки, обоснованным применением генетических алгоритмов, учетом социального эффекта, позволяет детерминировать зоны повышенной экологической напряженности и осуществлять решение природоохранных оптимизационных задач в 2–9 раз быстрее.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рыбак, В.А.** Антропогенная нагрузка на окружающую среду: количественная оценка, анализ, нормирование: Монография [Текст] / В.А. Рыбак. – Минск: РИВШ, 2010. – 334 с.

2. **Куприянов, М.С.** Генетические алгоритмы и их реализация в системах реального времени [Текст] / М.С. Куприянов, Н.И. Матвиенко // Информационные технологии. – 2001. – № 1. – С. 17–21.

3. **Рутковская, Д.** Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы [Текст] / Д. Рутковская,

М. Пилиньский, Л. Рутковский; Пер. с польск. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.

4. **Рыбак, В.А.** Влияние загрязнения окружающей среды на здоровье населения [Текст] / В.А. Рыбак. – Минск: РИВШ, 2008. – 368 с.

5. **Рахманин, Ю.А.** Научно-методические и экономические аспекты решения региональных проблем в области медицины окружающей среды [Текст] / Ю.А. Рахманин [и др.] // Санитария и гигиена. – 2005. – № 6. – С. 6–9.

УДК:004.9:[656.625.078.89.004.12:658.012]

А.А. Ханова

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ СТРУКТУРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЕМ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ (НА ПРИМЕРЕ ГРУЗОВОГО ПОРТА)

Важная задача повышения эффективности и конкурентоспособности предприятия – определение долгосрочных стратегических целей деятельности и построение системы управления, обеспечивающей полное согласование стратегических целей и текущих задач, решаемых подразделениями на всех уровнях управления [1].

Анализ существующей системы управления по стратегическим целям предполагает решение задач на нескольких уровнях: разработку стратегии; сбалансированной системы показателей (ССП); системы функционально-стоимостного управления; разработку системы бюджетирования (рис. 1). Цикл управления (0), включающий последовательно блоки $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 8$, соединенные белыми стрелками, предполагает «движение» информации сверху вниз и снизу вверх [2] и позволяет осуществлять мониторинг состояния предприятия (грузового порта) с учетом

внедрения всех мероприятий, включающих блоки 2–4, исполнения этих мероприятий в блоке 5 и анализ уже полученных на практике результатов в блоках 6–8. Однако такой подход не позволяет оценить возможности и угрозы выбранной стратегии заранее (до ее реализации), сгенерировать вариант SSP в зависимости от стратегии, оценить степень влияния различных факторов на функционирование грузового порта (ГП) при реализации той или иной стратегии, выявить взаимовлияющие показатели и сформировать управленческие решения. В связи с этим актуальна задача совершенствования структуры управления предприятием на основе мультиаспектных интегрированных моделей предметной области.

Двойной цикл управления грузовым портом

Для устранения этой проблемы предлагается модифицировать представленный цикл управле-

ния эффективностью путем добавления контура управления, позволяющего, предварительно сформировав ССП, оценить реализацию стратегии в тех или иных условиях за счет введения в контур управления репозитория мультиаспектных интегрированных моделей предметной области (SCIEO-моделей).

Первый контур двойного цикла управления (рис. 1) включает в себя выполнение блоков $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 9 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 1$, соединенных черной стрелкой 1. Первый контур начинается с определения стратегии развития ГП (блок 1). Базовое стратегическое направление конкретизируется путем построения стратегической карты ССП в виде целей и ключевых показателей эффективности, объединенных причинно-следственными связями (блок 2).

Процессно-ориентированное планирование (блок 3) начинается с разработки процессной модели грузового порта, отражающей основные бизнес-процессы ГП, с детализацией каждого процесса [3]. Однако формирование ССП, функционально-стоимостный анализ (ФСА), верификация и валидация ССП будут осуществляться не по результатам фактической работы ГП,

а по результатам прогонов имитационной модели, а также за счет накопленной эмпирической информации в результате действия других SCIEO-моделей (блок 9). Это позволяет в сжатые сроки в режиме реального времени осуществить проверку выбранной стратегии, пересмотреть направления развития, сделать выводы о возможностях и угрозах с учетом неопределенности воздействия случайных экзо- и эндогенных факторов, изучить влияние этих факторов

Блок 7 «Функционально-стоимостной анализ» предназначен для учета и анализа стоимости продуктов (услуг, в случае ГП). В результате проведения общего функционально-стоимостного анализа (ФСА) разрабатывается оптимальная структура бизнес-процесса с оптимальным множеством параметров – времени и стоимости. При этом оптимальное или желаемое множество параметров задается стратегическими целями компании [4].

В блоке 8 «Контроль ССП» происходит представление фактических результатов деятельности в сжатом, агрегированном виде, необходимом для сравнения запланированных, целевых значений показателей ССП с реально достигнутыми.

Блок 10 «Реестр рисков» содержит перечень выявленных рисков, реализация которых создает

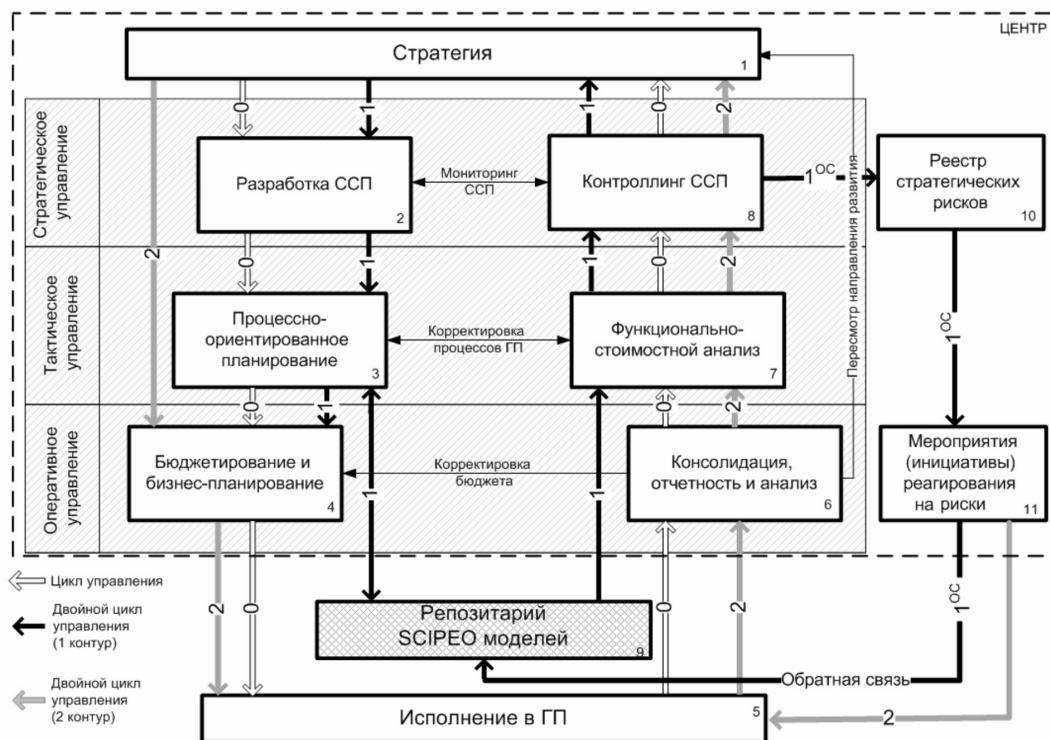


Рис. 1. Концептуальная структура системы управления ГП

угрозу для достижения соответствующих целей и показателей ССП. В блоке 11 «Управленческие решения (инициативы)» реагирования на риски содержится база управленческих решений для реагирования на выявленные риски. Эти управленческие решения можно реализовать на имитационной модели, осуществлять корректировку бюджета и, в конечном итоге, формировать варианты реализации стратегии и принимать решения о реализации выбранной стратегии на практике. Блоки 10 и 11 представляют собой по сути обратную связь в управлении ГП.

Второй контур двойного цикла управления (см. рис. 1) включает в себя выполнение блоков $1 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 8 \rightarrow 1$, соединенных серой стрелкой (2), и в целом соответствует известной

структуре управления, но с учетом внедрения в деятельность ГП управленческих решений, выявленных в блоке 11.

Таким образом, двойной цикл управления представляет собой управление процессами ГП на основе SCIEPO-моделей (1 контур) и реализацию управления непосредственно в ГП (2 контур). Механизмы управления можно рассматривать по трем уровням: стратегическое управление (основано на ССП), тактическое управление (основано на функционально-стоимостном управлении) и оперативное управление (основано на бюджетировании). Центральное место в предложенной структуре управления занимает репозиторий SCIEPO-моделей, предоставляющий возможность мультиаспектного интегрированного моделирования предметной области. Рассмотрим систему SCIEPO-моделей.

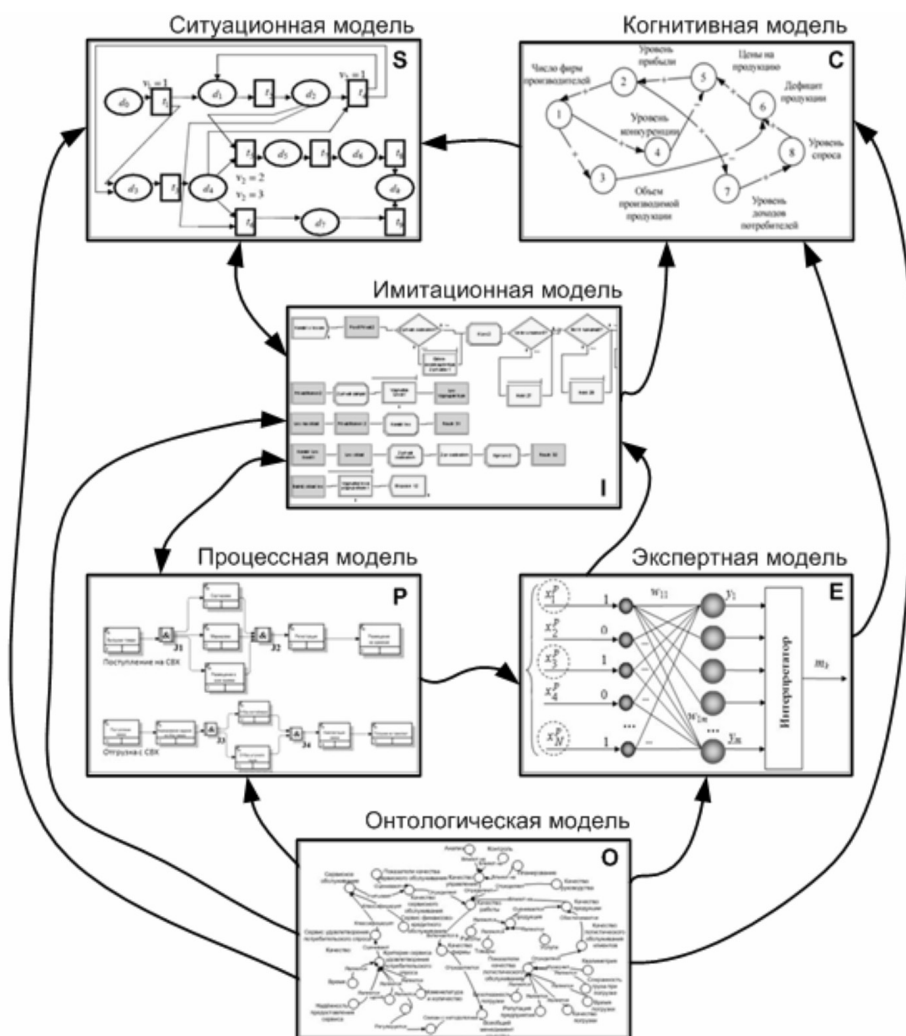


Рис. 2. Комплексная интеграция и конвергенция SCIEPO-моделей предметной области

Мультиаспектное интегрированное моделирование предметной области

Для таких сложных систем, как ГП, требуется консолидация и визуализация многочисленных разнородных исходных данных с помощью аппаратно-программных комплексов, для которых используются различные модели Data Mining, средства бизнес-аналитики, методы индикационного анализа (ФСА, ССП), интерпретация, анализ и прогнозирование ситуаций на основе имеющихся данных и возможных вариантов их изменения, а также специализированные технические решения. Поэтому за основу берутся сложные модели динамического ситуационного, имитационного, экспертного и др. представлений [5].

В качестве научно-методической базы для комплексной интеграции и конвергенции систем моделирования предлагается использовать ситуационно-когнитивно-имитационно-процессно-экспертно-онтологическое (SCIPRO) моделирование, являющееся развитием концепции ситуационно-имитационно-экспертного (SIE) моделирования [5].

Основополагающим принципом SCIPRO-моделирования является гипотеза о возможности представления мыслительной деятельности лица, принимающего решение (ЛПР), с помощью шести типов моделей (аспектов) представления предметной области (рис. 2).

Онтологическая модель в репозитории моделей является средством структурирования, формализации и унификации представления знаний с целью их многократного и гибкого использования. Онтология выполняет функции концептуальной модели для непроектного синтеза динамических моделей с использованием предложенных методов и технологий [6].

Для конструирования онтологии предложено использовать двухуровневые конфаинмент-модели (КМ), имеющие фиксированную структуру на верхнем уровне и налагающие специфическую семантическую нагрузку на каждый свой элемент. Онтологию верхнего уровня предложено представлять в виде концептуальной КМ, основанной на «классической» ограниченной 9-элементной конфаинмент-модели, предложенной Т.В. Гагиным [7]. Онтологию второго уровня нами предложено представить в виде совокупности иерархических КМ: гиперонимической КМ. Элементы модели которой связаны иерархиче-

ским родовидовым отношением «ЯВЛЯЕТСЯ» (рис. 3). Одна из разновидностей онтологических моделей – процессная КМ.

Процессная модель представляет собой статическую архитектуру системы, где все имеющиеся «сквозные» процессы (для ГП это перегрузочные, складские, подъемно-транспортные и вспомогательные процессы), определяются как целенаправленные последовательности операций, приводящих к заданному конечному результату [8]. Для описания процессной модели используются методики класса **Work Flow**, наиболее распространенные из которых – **eEPC** и **IDEF3** [8]. Процессная модель является инструментарием для анализа внутренней среды ГП.

Процессное управление основывается на циклической реализации информационно-технологической цепочки: модель текущего состояния (AS-IS) → идеальная модель желаемого состояния (TO-BE) → реальная модель желаемого состояния (Improved TO-BE). Важнейшую роль при этом играет имитационное моделирование, обеспечивающее наиболее обоснованное формирование модели Improved TO-BE, являющейся основным ориентиром развития организации.

Имитационная модель позволяет [9] избежать дорогостоящих ошибок, вызываемых реализацией исключительно интуитивных решений; создавать модели, ориентированные на учет неопределенности и случайности как внешних условий, так и самой моделируемой системы; обнаруживать скрытые резервы и устранять факторы, негативно влияющие на внутренние процессы системы. Имитационная модель представляет собой инструментарий детализации решения, распределения полномочий и ресурсов путем применения методов логистического управления, а также разнообразных методик для анализа основных фондов, качества обслуживания, логистических затрат ГП и др. [10]. Следует отметить, что имитационная модель позволяет обеспечить эффективное принятие решения в тех случаях, когда возникают новые ситуации и накопленного опыта недостаточно. ЛПР, используя знание предметной области, ее структуры и взаимосвязи, оценивает с помощью мысленного, натурного или компьютерного моделирования возможные варианты решений и их последствия. Полученные таким образом знания проверяются и апробируются, после чего переходят в разряд экспертного опыта.

Экспертная модель содержит формализован-

ное описание накопленного экспертом опыта по решению различных задач в предметной области и позволяет моделировать его рассуждения [11]. Мнения экспертов при формировании структуры

целей ССП в зависимости от стратегии, а также подбор показателей для каждой цели помещаются в базу знаний (БЗ). На базе экспертной информации, с применением методов искусственного

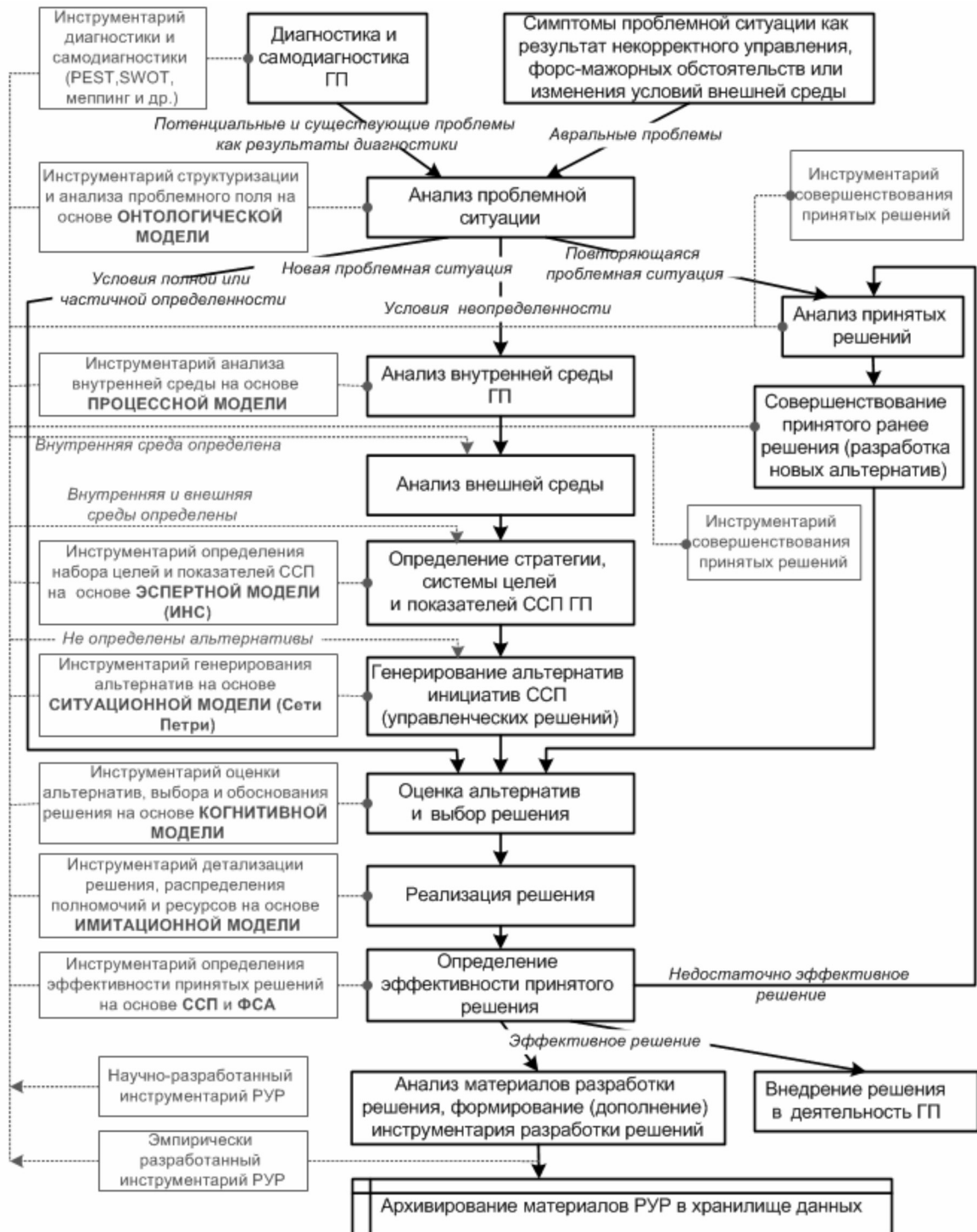


Рис. 3. Схема РУР во взаимосвязи этапов, условий и применяемого инструментария в виде совокупности SCIEPO-моделей

интеллекта на основе нейронных сетей Кохона формируется стратегическая карта ССП [12]. Кроме того, в каждой модели SCIEO используется экспертная информация.

Когнитивная модель позволяет устанавливать взаимовлияния отклонений от нормы показателей на основе функциональных когнитивных карт [13]. Использование когнитивной модели необходимо для оценки синергии показателей ССП.

Ситуационная модель основана на использовании специальных элементов, описывающих микроситуации конкретных объектов и процессов, применении экспертных систем и инструментов Data Mining для определения макроситуаций. ЛПР производит обобщение, классификацию, выявляет зависимости в исходных данных, уменьшает их размерность и тем самым обеспечивает эффективную работу. Для моделирования процесса получения информации о параметрах ГП, анализа данных, информирования ответственных лиц и инициализации управленческого решения с учетом параллельности и асинхронности принимаемых решений, а также их вероятностного характера, нами предложено использовать сети Петри [14].

Важно отметить, что представление мыслительной деятельности ЛПР в виде мультиаспектной интегрированной SCIEO-модели является полным, т. к. позволяет смоделировать предметную область: объекты, связи между ними, процессы, явления и ситуации.

Схема принятия управленческих решений на основе SCIEO-моделей

Схема цикла разработки управленческих решений (РУР) [15] на основе мультиаспектной интегрированной модели предметной области представлена на рис. 3. Циклический характер РУР заключается в том, что если в результате реализации решения эффективность его оказалась низкой, то принятое решение необходимо пересмотреть, усовершенствовать или разработать вновь.

Одни проблемы (выход из строя оборудования) можно решить полностью, другие – частично (снизить текучесть кадров). Некоторые проблемы вообще не решаются, а лишь снимается их острота (конфликт целей собственников и управленческого персонала или конфликт между интересами (целями) ГП и конкурентов).

Несмотря на то, что проблему можно решить корректировкой и согласованием целей, priori-

тетными все же считаются решения, направленные на изменение конкретной ситуации. Если ситуация изменяется незначительно или меняется не в соответствии с целью ГП, то это означает, что либо не были учтены какие-либо факторы, влияющие на процесс реализации решения, либо появились новые факторы как результат постоянно изменяющихся условий внешней среды.

В практике управления ГП в большинстве случаев ситуация полной определенности встречается редко. Нередко при РУР необходимо определять цели, критерии, альтернативы и их исходы. Эти ситуации называются *ситуациями полной или частичной неопределенности*. Цели ГП могут быть детерминированы обстоятельствами или ранее разработанной стратегией. В таком случае проблема заключается в рассогласовании целей и текущего состояния ГП, т. е. в конфликте состояний (несоответствие существующего и желаемого или необходимого). Критерии – это количественно выраженные цели ССП. Решающее правило определяется выявлением корреляционных зависимостей между показателями ССП ГП. Альтернативы могут быть определены и ограничены имеющимися ресурсами или состоянием внешней среды. Каждый этап цикла представляет собой логически обособленную целями этапа процедуру, требующую своего инструментария SCIEO-моделей.

Предложена концептуальная структура системы управления грузовым портом, отличающаяся наличием методов индикационного анализа (ФСА, ССП), двойного контура управления на основе мультиаспектных интегрированных SCIEO-моделей. Описан подход к интеграции и конвергенции ситуационной, когнитивной, имитационной, процессной, экспертной, онтологической моделей, позволяющий оценить возможности и угрозы стратегии развития ГП, сгенерировать вариант ССП, оценить степень влияния различных факторов на функционирование ГП при реализации той или иной стратегии, выявить взаимовлияющие показатели и сформировать управленческие решения. Разработана схема принятия управленческих решений в различных условиях; показано место SCIEO-моделей на этапах РУР. Результаты работы представляют определенный интерес, поскольку концептуальная структура управления на основе SCIEO-моделей в перспективе применима на предприятиях любой отрасли.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Духонин, Е.Ю.** Управление эффективностью бизнеса. Концепция Business Performance Management [Текст] / Е.Ю. Духонин, Д.В. Исаев, Е.Л. Мостовой [и др.]; Под ред. Г.В. Генса. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2005. – 269 с.
2. **Ханова, А.А.** Организация принятия решений в виде цикла управления эффективностью организации [Текст] / А.А. Ханова, А.С. Пономарева // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2011. – № 2. – С. 171–177.
3. **Ганюкова, Н.П.** Процессное управление системами корпоративного типа [Текст] / Н.П. Ганюкова, А.А. Ханова // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2011. – № 1. – Вып. 3. – С. 235–241.
4. **Ханова, А.А.** Функционально-стоимостной анализ затрат предприятия на основе имитационного моделирования [Текст] / А.А. Ханова, А.С. Пономарева // Св. об офиц. рег. прогр. для ЭВМ № 2010616551. от 01.10.2010.
5. **Филиппович, А.Ю.** Интегрированное SIE-моделирование [Текст] / А.Ю. Филиппович // Тр. XVII Всерос. научно-метод. конф. Телематика-2010. – СПб., 21–24 июня 2010. – С. 324–327.
6. **Мухачева, Н.Н.** Онтологические модели и методы для управления информационно-интеллектуальными ресурсами организации [Текст] / Н.Н. Мухачева, Д.В. Попов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2010. – Т. 14. – № 1. – С. 123–135.
7. **Гагин, Т.В.** Как выделить главное: принципы конфайнмент-моделирования [Электронный ресурс] / Т.В. Гагин, С.С. Бородин. – Режим доступа: <http://www.gagin.org>
8. **Абдикеев, Н.М.** Реинжиниринг бизнес-процессов: Учебник [Текст] / Н.М. Абдикеев, Т.П. Данько, С.В. Ильдеменов [и др.]; 2-е изд., испр. – М.: Эксмо, 2007. – 592 с.
9. **Проталинский, О.М.** Имитационная модель технологических процессов грузового порта [Текст] / О.М. Проталинский, А.А. Ханова, И.О. Бондарева // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2010. – № 4 (50). – Вып. 2. – С. 134–144.
10. **Ханова, А.А.** Аналитическая система поддержки управленческих решений в грузовом порту на основе BALANCED SCORECARD [Текст] / А.А. Ханова, Е.С. Потапова // Св. об офиц. рег. прогр. для ЭВМ № 2009614926 от 10.09.2009.
11. **Ханова, А.А.** Формирование сбалансированной системы показателей предприятия на основе искусственных нейронных сетей (на примере грузового порта) [Текст] / А.А. Ханова, О.В. Шубина // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2011. – № 1. – С. 187–194.
12. **Ханова, А.А.** Интеллектуальная информационная система формирования сбалансированной системы показателей предприятия на основе нейронных сетей [Текст] / А.А. Ханова, О.В. Шубина // Св. об офиц. рег. прогр. для ЭВМ № 2010616551 от 01.10.2010.
13. **Юдицкий, С.А.** Триадный подход к моделированию систем сетецентрического управления [Текст] / С.А. Юдицкий, П.Н. Владиславлев, Д.С. Точ // Управление большими системами: Сб. трудов. – 2010. – № 28. – С. 24–39.
14. **Зубова, Т.Н.** Использование сетей Петри для моделирования процесса принятия управленческих решений [Текст] / Т.Н. Зубова, Б.Ф. Мельников // Вектор науки ТГУ. – 2011. – № 3 (17). – С. 33–37.
15. **Лапыгин, Ю.Н.** Управленческие решения: Учеб. пособие [Текст] / Ю.Н. Лапыгин, Д.Ю. Лапыгин. – М.: ЭКСМО, 2009. – 448 с.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ТИПОВЫХ СИТУАЦИЙ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА

Стабильность работы городского общественного транспорта находится в прямой зависимости от нарушений движения транспортного процесса.

Типовые ситуации, сложившиеся на дороге в процессе функционирования общественного транспорта, характеризуются большим количеством факторов, представленных вербально. Поэтому для формализации данного типа ситуации необходимо применение методов искусственного интеллекта [1]. Наиболее подходящим математическим аппаратом описания таких факторов являются нечеткие множества.

Нечеткие факторы, характеризующие ситуацию, неопределенность внешней среды (реакция участников движения на сложившуюся ситуацию, слабопрогнозируемые последствия применяемых воздействий), недостаточная достоверность информации о ситуации, качественный характер ее описания и управляющих воздействий не позволяют строить систему управления рассматриваемого объекта на основе традиционного подхода с использованием математической модели. Поэтому возникает необходимость построения системы управления не на основе модели объекта, а на модели управления им.

С точки зрения достижения эффективного управления движением общественного электро-транспорта и процессом доставки пассажиров наиболее подходящим методом управления является ситуационный подход на основе нечеткой логики (нечеткое ситуационное управление). Главную роль играет понятие ситуации как набора значений признаков, описывающих состояние объекта управления в некоторый момент времени. Все возможные состояния объекта управления описываются набором типовых ситуаций, каждая из которых представляет собой совокупность лингвистических значений признаков.

Представим ситуацию, сложившуюся в процессе функционирования городского электро-транспорта в виде нечеткой ситуации [3]:

$$\tilde{s} = \{ \langle \mu_s(y_i) / y_i \rangle \}, y_i \in Y, \quad (1)$$

где $\mu_s(y_i) = \{ \langle \mu_{s_j}(y_i) \rangle \}$ – функция принадлежности

лингвистической переменной (фактора) y_i , характеризующего ситуацию $\tilde{s}$.

Детализируем представление $\mu_s(y_i)$:

$$\mu_s(y_i) = \{ \langle \mu_{s_j}(y_i) / T_j^i \rangle \}, j \in L, i \in J, \quad (2)$$

где T_j^i – j -й терм терм-множества i -й лингвистической переменной y_i ; $\mu_{s_j}(y_i) / T_j^i$ – функция принадлежности y_i .

Ограниченный набор нечетких ситуаций может описывать практически бесконечное число состояний объекта управления. Ситуационный уровень управления движением троллейбусов включает в себя три основных блока (рис. 1).

Таким образом, состояние объекта управления представляется в виде нечеткой ситуации, которая сравнивается со всеми типовыми ситуациями, хранящимися в решающей таблице. Определяется типовая нечеткая ситуация, близкая входной нечеткой ситуации. После чего информация об этой типовой нечеткой ситуации поступает в блок принятия решений, где определяются управляющие воздействия.

В качестве примера типовой нечеткой ситуации рассмотрим «Опоздание», которое характеризуется двумя факторами: «Скорость движения» v_N и «Состояние препятствий на маршруте» S_P . Обозначим $y_1 = v_N, y_2 = S_P$.

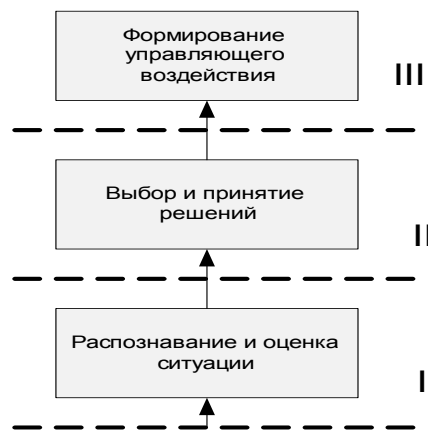


Рис. 1. Уровни ситуационного управления

Пусть $Y = \{y_1, y_2\}$ – набор факторов, характеризующих типовую нечеткую ситуацию $\tilde{s}$, терм-множества лингвистических переменных y_1 и y_2 . $T_1 = \{T_1^1, T_2^1, T_3^1, T_4^1, T_5^1, T_6^1, T_7^1\}$, $T_2 = \{T_1^2, T_2^2, T_3^2, T_4^2, T_5^2, T_6^2, T_7^2\}$ задаются в виде

$$\tilde{s} = \left\{ \langle \langle 0 / BND \rangle, \langle 0,8 / MND \rangle, \langle 0,6 / SND \rangle, \langle 0,2 / N \rangle, \langle 0 / SPD \rangle, \langle 0 / MPD \rangle, \langle 0 / LPD \rangle / y_1 \rangle, \langle \langle 0 / BND \rangle, \langle 0 / MND \rangle, \langle 0,2 / SND \rangle, \langle 0,4 / N \rangle, \langle 0,6 / SPD \rangle, \langle 0,8 / MPD \rangle, \langle 1 / LPD \rangle / y_2 \rangle \right\}. \quad (3)$$

Для определения состояния объекта управления необходимо сравнить входную нечеткую ситуацию $\tilde{s}_0$ с каждой нечеткой ситуацией из некоторого набора типовых нечетких ситуаций $S = \{\tilde{s}_1, \tilde{s}_2, \dots, \tilde{s}_N\}$.

Эталонные ситуации строятся таким образом, что каждая из них покрывает некоторое число возможных входных ситуаций и является объединением этих ситуаций. Ограниченный набор эталонных нечетких ситуаций позволяет описать неограниченное число состояний анализируемой системы [3].

Для распознавания входная ситуация сравнивается с эталонными на нечеткое включение.

В качестве меры для определения степени близости нечеткой ситуации $\tilde{s}_0$ нечеткой ситуации $\tilde{s}_i \in S$ ($i \in K = \{1, 2, \dots, N\}$) можно использовать:

степень нечеткого включения нечеткой ситуации $\tilde{s}_0$ в нечеткую ситуацию $\tilde{s}_i$;

степень нечеткого равенства $\tilde{s}_0$ и $\tilde{s}_i$;

степень нечеткой общности $\tilde{s}_0$ и $\tilde{s}_i$.

$$\tilde{s}' = \left\{ \langle \langle 0,9 / BND \rangle, \langle 0,7 / MND \rangle, \langle 0,5 / SND \rangle, \langle 0,1 / N \rangle, \langle 0 / SPD \rangle, \langle 0 / MPD \rangle, \langle 0 / LPD \rangle / y_1 \rangle, \langle \langle 0 / BND \rangle, \langle 0 / MND \rangle, \langle 0,4 / SND \rangle, \langle 0,6 / N \rangle, \langle 0,7 / SPD \rangle, \langle 0,9 / MPD \rangle, \langle 1 / LPD \rangle / y_2 \rangle \right\}.$$

Вычислим $v(\tilde{s}, \tilde{s}') = 0,5$. Это означает, что ситуация $\tilde{s}'$ не включается в ситуацию $\tilde{s}$, следовательно база типовых ситуаций требует корректировки. В качестве алгоритма коррекции базы типовых ситуаций для систем управления можно предложить тривиальный алгоритм, представленный на рис. 2.

После распознавания типа ситуации путем определения степени близости текущей и эталонной ситуации, возникает необходимость принятия решения, т. е. выбора управляющего воздействия.

Процесс принятия решений системы управления основывается на построении таблицы соответствия между всеми возможными ситуациями и некоторым набором управляющих решений, раз-

$\{BND, MND, SND, N, SPD, MPD, LPD\}$, где B – большое, M – среднее, S – малое, D – отклонение, в N – отрицательном, P – положительном направлении от N – нормального значения. Тогда одна из возможных ситуаций «Опоздание»:

Определяясь некоторой мерой близости, задаются некоторые нечеткие отношения между ситуациями, в частности, между ситуациями $\tilde{s}_0$ и $\tilde{s}_i$, ($i \in K$), а также между типовыми ситуациями из набора S . Выберем в качестве базового способа сравнения ситуаций нечеткое включение ситуации. Степень включения ситуации $\tilde{s}_i$ в ситуацию $\tilde{s}_j$ обозначается $v(\tilde{s}_i, \tilde{s}_j)$ и определяется выражением $v(\tilde{s}_i, \tilde{s}_j) = \bigwedge_{y \in Y} v(\mu_{s_i}(y), \mu_{s_j}(y))$.

Величина $v(\mu_{s_i}(y), \mu_{s_j}(y))$ является степенью включения нечеткого множества $\mu_{s_i}(y)$ в нечеткое множество $\mu_{s_j}(y)$.

Ситуация $\tilde{s}_i$ нечетко включается в ситуацию $\tilde{s}_j$, $\tilde{s}_i \subset \tilde{s}_j$, если степень включения $\tilde{s}_i$ и $\tilde{s}_j$ не меньше некоторого порога включения $t_{inc} \in [0,6; 1]$, определяемого условиями управления, т. е. $v(\tilde{s}_i, \tilde{s}_j) \geq t_{inc}$. Иначе говоря, ситуация $\tilde{s}_i$ нечетко включается в ситуацию $\tilde{s}_j$, если нечеткие значения признаков ситуации $\tilde{s}_i$ нечетко включаются в нечеткие значения соответствующих признаков ситуации $\tilde{s}_j$.

Пусть на вход пришла ситуация вида

мер которой определяется количеством ситуаций и зависит от степени конкретизации значений признаков [2].

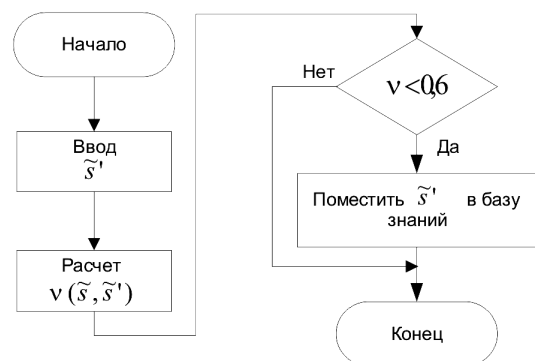


Рис. 2. Алгоритм коррекции базы типовых ситуаций

Допустим, управляющие решения по факторам заданы следующими терм-множествами:

$$R_1 = \left\{ \begin{array}{l} R_1^1 - \text{«сильно увеличить»}, R_2^1 - \text{«немного увеличить»}, R_3^1 - \text{«не изменять»} \\ R_4^1 - \text{«немного уменьшить»}, R_5^1 - \text{«сильно уменьшить»} \end{array} \right\}$$

$$R_2 = \{R_1^2 - \text{«устранить»}, R_2^2 - \text{«не устранять»}\}.$$

Построим матрицы отношений, описывающих воздействие управляющих решений $R_1 = \{R_1^1, R_2^1, R_3^1, R_4^1, R_5^1\}$ на фактор y_1 :

	T_1^1	T_2^1	T_3^1	T_4^1	T_5^1	T_6^1	T_7^1		T_1^1	T_2^1	T_3^1	T_4^1	T_5^1	T_6^1	T_7^1	
$M_1^1=$	T_1^1	0	0	0,1	0,2	0,3	0,5	1	T_1^1	0	0,1	0,4	1	0,1	0	0
	T_2^1	0	0	0,1	0,2	0,4	0,7	1	T_2^1	0	0	0,4	1	0,5	0	0
	T_3^1	0	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	T_3^1	0	0	0	0,4	1	0,3	0,1
	T_4^1	0	0	0	0,5	0,7	0,8	1	T_4^1	0	0	0	0	0,4	1	0,3
	T_5^1	0	0	0	0	0,7	0,8	1	T_5^1	0	0	0	0	0	0,7	1
	T_6^1	0	0	0	0	0	0,9	1	T_6^1	0	0	0	0	0	0	1
	T_7^1	0	0	0	0	0	0	1	T_7^1	0	0	0	0	0	0	1
	T_1^1	T_2^1	T_3^1	T_4^1	T_5^1	T_6^1	T_7^1		T_1^1	T_2^1	T_3^1	T_4^1	T_5^1	T_6^1	T_7^1	
$M_3^1=$	T_1^1	1	0,1	0	0	0	0	0	T_1^1	1	0	0	0	0	0	0
	T_2^1	0,1	1	0,1	0	0	0	0	T_2^1	1	0,1	0	0	0	0	0
	T_3^1	0	0,1	1	0,1	0	0	0	T_3^1	0,6	1	0,1	0	0	0	0
	T_4^1	0	0	0,1	1	0,1	0	0	T_4^1	0	0,2	1	0,6	0	0	0
	T_5^1	0	0	0	0,1	1	0,1	0	T_5^1	0	0	0,2	1	0,7	0	0
	T_6^1	0	0	0	0	0,1	1	0,1	T_6^1	0	0	0	0,1	1	0,6	0
	T_7^1	0	0	0	0	0	0,1	1	T_7^1	0	0	0	0	0,1	1	0,5
	T_1^1	T_2^1	T_3^1	T_4^1	T_5^1	T_6^1	T_7^1		T_1^1	T_2^1	T_3^1	T_4^1	T_5^1	T_6^1	T_7^1	
$M_5^1=$	T_1^1	0,1	0	0	0	0	0	0								
	T_2^1	1	0	0	0	0	0	0								
	T_3^1	1	0,2	0	0	0	0	0								
	T_4^1	0,1	1	0,2	0	0	0	0								
	T_5^1	0	0,1	1	0,2	0,1	0	0								
	T_6^1	0	0	0,1	1	0,2	0	0								
	T_7^1	0	0	0	0,1	1	0,1	0								

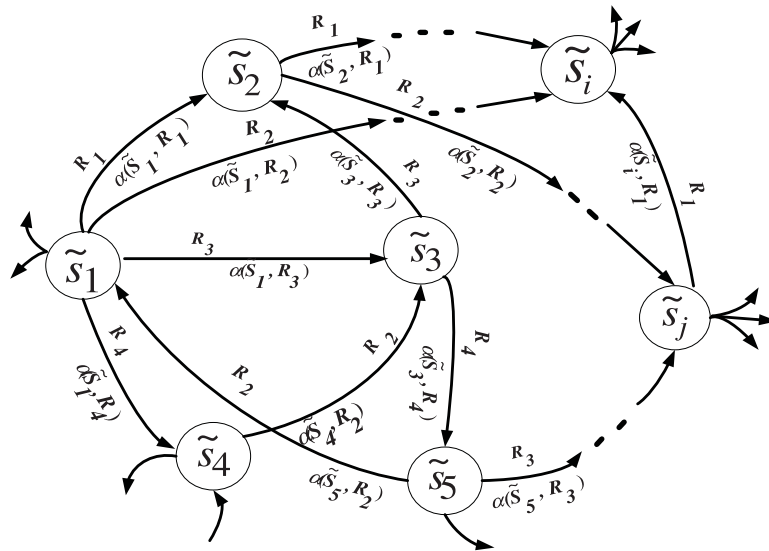


Рис. 3. Нечеткая ситуационная сеть

Управляющие решения задают некоторые преобразования значений признаков, каждому i -му терму управляющих решений ставится в соответствие матрица отношений M_j^i , которая описывает силу воздействия управляющего решения на значение данного признака.

Целевая ситуация в данном случае определяется исходя из анализа степеней предпочтения управляющих решений. Для постановки целевой ситуации необходимо построить нечеткую ситуационную сеть (рис. 3), где $\tilde{s}_i (i \in I = \{1, 2, \dots, n\})$ – эталонные нечеткие ситуации; $R_j (j \in P = \{1, 2, \dots, f\})$ – управляющие решения; $\alpha(\tilde{s}_i, R_j)$ – степень предпочтения применения управляющего решения R_j в ситуации $\tilde{s}_i$ по сравнению с другими возможными решениями из множества $R = \{R_1, R_2, \dots, R_f\}$.

Степени предпочтения управляющих решений в каждой ситуации либо неизменны и определяются экспертным опросом, либо некоторым образом зависят от ситуации и определяются предпочтительным решением в данной ситуации. Управляющее решение, соответствующее текущей ситуации, представляет собой последовательность решений, необходимых для перехода от текущей ситуации к целевой по «оптимальному маршруту» в нечеткой ситуационной сети. Вывод решения разбивается на постановку цели (целевой ситуации) и построение стратегии управле-

ния, соответствующую оптимальному переводу объекта в целевое состояние.

Данная нечеткая ситуационная сеть представляет собой нечеткий ориентированный взвешенный граф, вершины которого соответствуют эталонным нечетким ситуациям, дуги взвешены управляющими решениями, необходимыми для перехода по ситуациям, и степенями предпочтения этих решений.

Применение нечеткого ситуационного управления для формирования управляющего воздействия на основе информации о текущей ситуации чрезвычайно актуально при возникновении аварийных ситуаций на дороге в процессе движения общественного транспорта.

Таким образом, нечеткое ситуационное управление движением общественного транспорта на основе нечеткого включения ситуаций, возникающих в процессе эксплуатации транспорта, позволяет увеличить экономическую эффективность работы транспортных предприятий (за счет снижения эксплуатационных затрат вследствие принятия решений на основе реальной дорожной ситуации), а также повысить удовлетворенность пассажиров качеством предоставляемых услуг, которое определяется своевременным прибытием транспорта на остановочный пункт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверкин, А.Н. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта [Текст] /

А.Н. Аверкин, И.З. Батыршин, А.Ф. Блишун [и др.]. – М.: Наука, 1986. – 312 с.

2. **Борисов, В.В.** Нечеткие модели и сети [Текст] / В.В. Борисов, В.В. Круглов, А.С. Федулов. –М.: Горячая линия – Телеком, 2007. –284 с.

3. **Мелихов, А.Н.** Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой [Текст] / А.Н. Мелихов, Л.С. Бернштейн, С.Я. Коровин. –М.: Наука, 1990. –272 с.

УДК 004.413.4

Ю.А. Голуб, А.О. Новиков, Д.А. Логинова

АНАЛИЗ ПРИНЦИПОВ ФОРМИРОВАНИЯ БАЗ ДАННЫХ ДЛЯ МОНИТОРИНГА И ОЦЕНКИ ПРОЦЕССОВ НАУКОЕМКОГО КЛАСТЕРНОГО РАЗВИТИЯ

Кластерный подход представляет собой формы территориально-отраслевой организации производства, способствующей реализации инновационных предпринимательских проектов экономического развития, обуславливающих синергетический эффект взаимодействия с научными, проектными институтами при заинтересованном участии государственных и муниципальных органов управления. Кластерный подход позволяет создать эффективную экономику на местах, ориентированную на активизацию и коммерциализацию научных открытий и изобретений, производство конкурентной наукоемкой продукции, что будет способствовать обеспечению позитивных структурных сдвигов в экономике Российской Федерации в целом.

Кластер характеризуется составом участников и конечным продуктом, при этом также необходим количественный анализ кластера на основе сбора статистической и документальной информации о нем.

Статистическое исследование состоит из углубленного исследования с использованием специфических статистических данных и источников по выявлению количества работников и предприятий сектора предполагаемого кластера, темпов роста предприятий, включая количество новых предприятий за определенный промежуток времени, а также увеличение оборота и экспортных продаж. Оно также содержит данные о статистической концентрации фирм в кластере по сравнению с общим количеством фирм сектора в регионе и государстве.

Документальное исследование включает более специфические данные и источники по потенциаль-

ному кластеру. Основными источниками являются экономические отчеты, аналитические статьи, политики, стратегии. Документальное исследование также содержит информацию об инновационной составляющей кластера. Инновации – комплексное понятие, включающее в себя как сами новые технологии, так и инновации в образовательных и социальных процессах, при этом определяющим фактором является исследовательская кооперация. Уровень такой кооперации как раз и выявляет документальное исследование.

По завершению сбора статистических и документальных данных полученную информацию необходимо перепроверить через индивидуальные опросы участников кластера.

Известно, что наукоемкие процессы кластера обладают определенными свойствами и показателями. Для поиска «узкого места» необходимо иметь точную оценку процессов, а также механизм их взаимосвязанного прогнозирования и надежных методик мониторинга [5, 6].

Таким образом, актуальной задачей является оценка инновационного потенциала промышленного кластера. Цель оценки инновационного потенциала – определение направлений инновационного развития, обеспечивающих возможности перехода научно-производственных предприятий на выпуск конкурентоспособной продукции при существенном повышении устойчивости и гибкости предприятия по отношению к переменам во внешней среде. По результатам оценки групп показателей инновационного потенциала предприятия можно сделать вывод о том, какие аспекты функционирования предприятия, влияющие на инновационный потенциал, нуждаются в улучше-



нии, дополнительном финансировании. Знание уровня инновационного потенциала предприятия позволит руководству понять, какую роль с точки зрения инноваций играет предприятие в своем сегменте рынка, может ли выпускать конкурентоспособную инновационную продукцию, является ли предприятие «локомотивом» инновационного развития отрасли или же отстает от общих тенденций развития инноваций, способно ли предприятие в будущем обеспечивать себя инновациями для успешной конкурентной борьбы.

Оценка показателей инновационного потенциала предприятия позволяет [5]:

адекватно оценить состояние и готовность предприятия к инновационным преобразованиям;

проанализировать и спрогнозировать тенденции развития, выявить основные преимущества и слабые места;

подготовить рекомендации по формированию инновационной стратегии предприятия и механизмам ее реализации, которая послужит укреплению позиции на рынке;

создать и развивать информационные потоки для принятия эффективных управленческих решений.

Для оценки деятельности промышленного кластера, в т. ч. и его инновационного потенциала, используется множество количественных и качественных показателей. Накопление и обработка полученной информации приводит к необходимости разработки и проектирования специальных информационных систем. Для анализа наукоемких процессов в кластере в качестве информационной системы может выступать база данных с определенным количеством стандартизованных запросов, взаимосвязанных таблиц и отчетов.

Проектирование информационных систем в целом и формирование баз данных, как частного случая информационной системы, осуществляется по заранее определенным четким принципам, правилам, подчиняется определенным подходам. Проведенный анализ существующих принципов проектирования и разработки баз данных показал, что в настоящее время существует большое количество классификаций [1–4 и др.]. В частности, в работах А.А. Денисова, объединенных в учебниках и учебных пособиях «Теория систем и системный анализ», С.Т. Бира «Кибернетика и менеджмент», К. Бегг, Т. Коннолли

Классификация принципов разработки баз данных

Общие принципы построения БД и информационных систем	Принципы проектирования непосредственно базы данных мониторинга
1. Системности или системного подхода	Мониторинга в реальном масштабе времени
2. Оптимальности Беллмана	Функционирования в режиме инициативного информационного обеспечения
3. Комплексности	
4. Стандартизации	
5. Повторяемости	
6. Вариантности в стандартизации	
7. Взаимозаменяемости	
8. Эффективности	
9. Гибкости	
10. Развития	
Принципы проектирования БД	Принципы выбора состава предметной области БД
1. Учета интересов всех потенциальных пользователей	Движения «от задач» на основе функционального подхода
2. Модульный принцип разработки и внедрения	Свободных объектов предметной области, реализованный на основе предметного подхода

«Базы данных. Проектирование, реализация и сопровождение. Теория и практика», Е.П. Бочарова «Интегрированные корпоративные информационные системы: Принципы построения» и др. систематизация материалов позволила выделить четыре основных группы принципов (см. табл.).

Дадим краткую характеристику представленных в таблице принципов.

1. Принцип системности или принцип системного подхода означает, что система (база данных) рассматривается как большая система, состоящая из некоторого множества взаимосвязанных и взаимодействующих между собой элементов.

2. Принцип оптимальности Беллмана основан на основном положении динамического программирования, означает оптимальное *поведение* в задачах динамического программирования. Обладает тем свойством, что каковы бы ни были первоначальное *состояние* и *решение* (т. е. «управление»), последующие *решения* должны составлять оптимальное поведение относительно состояния, получающегося в результате первого решения. Этот принцип можно выразить, рассуждая от противного: если не использовать наилучшим образом то, чем мы располагаем сейчас, то и в дальнейшем не удастся наилучшим образом распорядиться тем, что мы могли бы иметь. Следовательно, если имеется оптимальная *траектория*, то и любой ее участок представляет собой оптимальную траекторию. Этот принцип позволяет сформулировать эффективный метод решения широкого класса *многошаговых задач*.

3. Принцип комплексности дает возможность при решении задачи моделирования отобразить в модели комплексность сложного объекта, его многоаспектность.

4. Принцип стандартизации учитывает многопользовательский характер информационных систем, имеет следующие аспекты:

информационный – на все информационные объекты должны быть установлены четкие правила их идентификации (грамматические правила их написания);

программный – при разработке многопользовательских, удаленных друг от друга систем, данные одной системы должны обрабатываться программным обеспечением другой системы;

аппаратный – связан с необходимостью снижения затрат на эксплуатацию компьютерной техники.

5. Принцип учета интересов всех потенциаль-

ных пользователей системы означает следующую последовательность разработки БД:

установить, каким специалистам и в каких подразделениях предприятия необходима информация о конкретном информационном объекте;

установить признаки описания объектов различными пользователями;

установить общий состав признаков объектов одного класса.

Использование такого принципа проектирования увеличивает сроки разработки БД, но обеспечивает значительное снижение затрат на разработку всей системы в целом.

6. Модульный принцип разработки и внедрения означает, что любая система должна разрабатываться в виде отдельных взаимосвязанных модулей (подсистем), которые могут внедряться в производстве отдельно, до окончательной разработки всей системы.

7. Принцип повторяемости означает определение круга объектов, к которым применимы вещи, процессы, отношения, обладающие одним общим свойством – повторяемостью во времени или в пространстве.

8. Принцип вариантности в стандартизации означает создание рационального многообразия (обеспечение минимума рациональных разновидностей) стандартных элементов, входящих в стандартизируемый объект.

9. Принцип взаимозаменяемости предусматривает (применительно к технике) возможность сборки или замены одинаковых деталей, изготовленных в разное время и в различных местах.

10. Принцип эффективности – выгоды от новой автоматизированной системы должны быть больше расходов на нее.

11. Принцип гибкости требует от системы возможности расширения без проведения больших изменений.

12. Принцип развития заключается в непрерывном обновлении функциональных и обеспечивающих составляющих системы.

Институт региональных инновационных систем провел анализ потенциала кластеризации профильных подотраслей промышленности Санкт-Петербурга и непромышленных видов деятельности.

Необходимо отметить, что данный анализ отраслей, проведенный на основании статистических данных, является только основой для принятия решения об идентификации кластеров.



Экспертам предлагалось оценить состояние и потенциал 18 отраслей Санкт-Петербурга с точки зрения их соответствия понятию «кластер» и возможности перерасти в кластер в будущем.

Все показатели (факторы), по которым предлагается производить оценку, разбиты на две группы: потенциал кластеризации и привлекательность рынка.

Экспертам предлагается заполнить по каждой отрасли две таблицы соответственно по каждой группе. В каждой таблице дан перечень факторов, определяющих данный критерий. Нужно оценить значение каждого фактора по рассматриваемой отрасли по семибалльной шкале: 7 означает, что по данному показателю рассматриваемая отрасль находится в наиболее выгодной позиции, 1 – в наименее выгодной.

В конце предлагается оценить значимость (веса) показателей (факторов) оценки кластерного потенциала отраслей. Это означает, что эксперты должны высказать свое мнение о важности каждого показателя для общей оценки кластерного потенциала отрасли. Если фактор очень важен, необходимо поставить оценку в 7 баллов, совсем не важен – 1 балл.

На следующем этапе полученные данные от экспертов обрабатываются следующим образом: вычисляются средние веса факторов;

вычисляются средневзвешенные оценки отраслей по каждому фактору.

Поток информации о факторах, изменение экспертных оценок в зависимости от условия существования кластера позволяет говорить о необходимости постоянного мониторинга поступающих показателей.

Формирование базы данных мониторинга показателей осуществляется по специальным принципам, характерным для баз данных именно такого типа.

1. Для формирования актуальной информации в базе данных используется принцип мониторинга в реальном масштабе времени: информация должна быть актуальной, оперативной и достоверной. Человек не должен участвовать в процессах сбора отчетных данных, они должны формироваться автоматически на основе следующего принципа: данные обрабатываются там, где они возникают.

2. Принцип функционирования в режиме инициативного информационного обеспечения, который в настоящее время может быть применен

к информационному обеспечению слабоструктурированных управленческих задач, обладающих сложной внутренней логикой и требующих большого количества разнообразной информации, поступающей из различных источников. Поэтому поставлена задача исследования и разработки методов и моделей создания автоматизированных информационных систем, обеспечивающих избирательное распространение информации, ретроспективный поиск по произвольным запросам и другие виды инициативного обслуживания пользователей. Особо следует отметить, что современный уровень развития проектирования баз данных, банков данных и баз знаний позволяет говорить о создании АИС.

Существует отдельная группа принципов, на основе которых происходит выбор состава предметной области. Эти принципы разработаны на основе двух подходов: функционального и предметного.

1. Принцип движения «от задач», реализуемый на основе функционального подхода, применяется тогда, когда заранее известны функции некоторой группы лиц и комплексов задач, для обслуживания информационных потребностей которых создается рассматриваемая БД. В этом случае можно четко выделить минимальный необходимый набор объектов предметной области, которые должны быть описаны.

2. Принцип свободных объектов предметной области, реализованный на основе предметного подхода, при этом информационные потребности будущих пользователей БД жестко не фиксируются. Они могут быть многоаспектными и весьма динамичными. Нельзя точно выделить минимальный набор объектов предметной области, которые необходимо описывать. В описание предметной области в этом случае включаются объекты и взаимосвязи, наиболее характерные и наиболее существенные для нее. БД, конструируемая при этом, называется *предметной*, т. е. она может использоваться при решении множества разнообразных, заранее не определенных задач.

Одним из факторов, формирующих устойчивые конкурентные преимущества региона и его предприятий, является создание конкурентоспособных кластеров, т. е. группы взаимосвязанных фирм и институтов, позволяющих использовать регион в качестве уникальной агломерационной среды, повышающей как эффективность каждого участника, так и его устойчивость в рамках совре-

менной сетевой экономической многоуровневой структуры. Кластеры выступают в качестве средства повышения конкурентоспособности экономики региона, перехода к производственным процессам с большей добавленной стоимостью, способствуют установлению конструктивных взаимоотношений между предприятиями, исследовательскими, образовательными, финансовыми учреждениями и органами власти.

Ключевые аспекты кластерной стратегии включают:

- 1) анализ рынка и деятельности предприятий;
- 2) идентификацию кластера, выявление его сильных и слабых сторон;
- 3) совместную стратегию – определение действий, необходимых для содействия. Развитие кластера в сотрудничестве с основными заинтересованными участниками в кластере;

4) реализацию стратегии;

5) мониторинг и оценку.

Важно помнить, что эти действия не должны быть последовательными, они должны протекать одновременно, опираясь друг на друга. Процесс оценки и мониторинга является одним из ключевых аспектов кластерной стратегии, поэтому очень важно реализовать его в полном объеме на современном уровне, чему способствует создание специальной информационной системы в виде базы данных.

Таким образом, проведен анализ принципов формирования баз данных, представлена их классификация, дана краткая характеристика, а также рассмотрены особенности применительно к задаче мониторинга и оценки процессов наукоемкого кластерного развития.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Денисов, А.А.** Основы теории систем и системного анализа: Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Системный анализ и управление» [Текст] / А.А. Денисов; Изд-е 2-е, перераб. и доп. –СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001.
2. **Бочаров, Е.П.** Интегрированные корпоративные информационные системы: Принципы построения: Учеб. пособие [Текст] / Е.П. Бочаров, А.И. Колдина. –М.: Финансы и статистика, 2005.
3. **Бир, С.** Кибернетика и менеджмент [Текст] / С. Бир; Пер. с англ.; Изд. 4-е. –М.: URSS, 2011. –280 с.
4. **Романов, А.Н.** Информационные системы в эко-

номике (лекции, упражнения и задачи): Учеб. пособие. [Текст] / А.Н. Романов, Б.Е. Одинцов. –М.: Вузовский учебник, 2008. –С. 38–90.

5. **Бабкин, А.В.** Инновационное развитие промышленности: кластерный подход: Монография [Текст] / А.В. Бабкин [и др.]. –СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2011. –484 с.

6. **Бабкин, А.В.** Проблемы и направления формирования промышленной политики региона [Текст] / А.В. Бабкин, Т.Ю. Кудрявцева, А.В. Бахмуцкая // Известия Санкт-Петербургского государственного университета экономики и финансов. –2011. –№ 4 (70). –С. 27–34.



СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОНТАКТНЫЕ ДАННЫЕ

АКСЕНОВ Константин Александрович – докторант кафедры автоматизированных систем управления Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, кандидат технических наук.

620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19. Тел. +7(343)375-41-45, e-mail: Wiper99@mail.ru

БЕЛЯВСКИЙ Григорий Исаакович – заведующий кафедрой высшей математики и исследования операций факультета математики, механики и компьютерных наук Южного федерального университета, доктор технических наук, профессор.

344007, г. Ростов-на-Дону, ул. Пушкинская, д. 70. E-mail: beliaivsky@hotmail.com

БОГАЧ Наталья Владимировна – доцент кафедры измерительных информационных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. E-mail: bogach@nm.ru

БУРДАКОВ Сергей Федорович – профессор кафедры механики и процессов управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. +7(812)552-77-78, e-mail: control2@compmech.spbstu.ru

БУРЛОВ Вячеслав Георгиевич – профессор кафедры национальной безопасности факультета управления и информационных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

ГОЛУБ Юлия Александровна – аспирант кафедры системного анализа и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. +7(812)591-66-58

ГРИГОРЬЕВ Лев Юрьевич – генеральный директор компании «Бизнес Инжиниринг Групп».

191015, Санкт-Петербург, Фуражный пер., д. 3. Тел. +7(812)640-74-81, e-mail: griglev@gmail.com

ЗАБЛОЦКИЙ Алексей Александрович – ведущий программист компании «Бизнес Инжиниринг Групп».

191015, Санкт-Петербург, Фуражный пер., д. 3. Тел. +7(812)640-74-82, e-mail: alexey-zablotskiy@yandex.ru

ЗЕНИНА Евгения Андреевна – аспирант кафедры национальной безопасности факультета управления и информационных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: janezen@mail.ru

КАМЕЛЬСКИЙ Владислав Дмитриевич – магистр кафедры автоматизированных систем управления Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина.

620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19. Тел. +7(343)375-41-45, e-mail: kusnizza@gmail.com

КВЯТКОВСКАЯ Ирина Юрьевна – директор Института информационных технологий и коммуникаций Астраханского государственного технического университета, доктор технических наук, профессор.

414025, г. Астрахань, ул. Татищева, д. 16. Тел. +7(8512)61-45-96, e-mail: i.kvyatkovskaya@astu.org

КОСТИН Евгений Владимирович – аспирант кафедры электропривода и автоматизации технологических процессов Норильского индустриального института.

663310, г. Норильск, ул. 50-лет Октября, д. 7. Тел. +7(3919)47-39-19, e-mail: kostin_engenii@bk.ru

КРИГЕР Лилия Сергеевна – аспирант кафедры прикладной информатики в экономике Астраханского государственного технического университета.

414025, г. Астрахань, ул. Татищева, д. 16. Тел. +7(8512)614-532, e-mail: kriger_l@mail.ru

КУДРЯВЦЕВ Дмитрий Вячеславович – доцент кафедры компьютерных интеллектуальных технологий в проектировании Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.

195220, Санкт-Петербург, ул. Обручевых, д. 1. E-mail: dmitry.ku@gmail.com

ЛОГИНОВА ДИАНА АЛЕКСАНДРОВНА – студентка механико-машиностроительного факультета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

МАЗИН Валерий Дмитриевич – профессор кафедры измерительных информационных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. +7(812)297-60-01, e-mail: masin@list.ru

МАТВЕЕВ Александр Владимирович – доцент кафедры национальной безопасности факультета управления и информационных технологий Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, кандидат технических наук.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: fcvega_10@mail.ru

НЕДОВОДЕЕВ Константин Владимирович – научный сотрудник Института высокопроизводительных компьютерных и сетевых технологий Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

190000, Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, д. 67. E-mail: polyphag@mail.ru, parallelgeek@gmail.com

НИКОНЕНКО Наталья Дмитриевна – преподаватель кафедры информационных технологий Северо-Кавказской академии государственной службы.

344007, г. Ростов-на-Дону, ул. Пушкинская, д. 70. E-mail: nnatd@rambler.ru

НОВИКОВ Александр Олегович – инженер научно-образовательного центра «Инновационная экономика промышленности», соискатель.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел +7(812)297-18-21.

ПИСАРЕВ Александр Иванович – заведующий кафедрой электропривода и автоматизации технологических процессов Норильского индустриального института, кандидат технических наук, доцент.

663310, г. Норильск, ул. 50-лет Октября, д. 7. Тел. +7(3919)47-39-19, e-mail: apissarev@yandex.ru

ПОПОВА Светлана Владимировна – старший преподаватель кафедры компьютерных интеллектуальных технологий в проектировании Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

РОГОВ Сергей Александрович – профессор кафедры квантовой электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор физико-математических наук.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: sarogov@mail.ru

РЫБАК Виктор Александрович – директор Центрального научно-исследовательского института комплексного использования водных ресурсов Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, кандидат технических наук, доцент.

220086, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Славинского, д. 1/2. Тел. +375172676522, e-mail: 6774338@tut.by

СЕРГЕЕВ Денис Сергеевич – аспирант кафедры квантовой электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. E-mail: enter_in_@rambler.ru

СИБИКИНА Ирина Вячеславовна – старший преподаватель кафедры информационной безопасности Астраханского государственного технического университета.

414025, г. Астрахань, ул. Татищева, д. 16. Тел. +7(512)61-45-87, e-mail: isibikina@bk.ru

СКОРОХОД Владимир Викторович – ассистент кафедры квантовой электроники Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.



СТЯПШИН Анатолий Александрович – аспирант Сургутского государственного университета Ханты-Мансийского автономного округа-Югры.

628412 Тюменская обл., ХМАО-Югра, г. Сургут, пр. Ленина, д. 1. Тел. +7(3462)76-29-00, e-mail: info@pr.surgu.ru

ХАНОВА Анна Алексеевна – докторант кафедры прикладной информатики в экономике Астраханского государственного технического университета, кандидат технических наук, доцент.

414025, г. Астрахань, ул. Татищева, д. 16. Тел. +7(8512)61-45-08, e-mail: akhanova@mail.ru

ХАРАЛДИН Николай Алексеевич – студент кафедры механики и процессов управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29. Тел. +7(812)552-77-78, e-mail: kharaldin@rambler.ru

ХОДЫРЕВ Иван Александрович – специалист IT-отдела ООО «Олимп».

191167, Санкт-Петербург, ул. Исполкомская, д. 15. E-mail: kivan-mih@yandex.ru

ЧЕРНОРУЦКИЙ Игорь Георгиевич – заведующий кафедрой информационных и управляющих систем, декан факультета технической кибернетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук, профессор.

195291, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21. E-mail: dean@ftk.spbstu.ru

ЧУПРОВ Виктор Александрович – магистр наук.

195291, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

ШАШИХИН Владимир Николаевич – профессор кафедры системного анализа и управления Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук.

195291, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 21.

АННОТАЦИИ

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Рогов С.А., Сергеев Д.С., Скороход В.В. УВЕЛИЧЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ-ШУМ В АКУСТООПТИЧЕСКОМ АНАЛИЗАТОРЕ СПЕКТРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АСТИГМАТИЧЕСКОЙ ОПТИКИ.

Приведен расчет отношения сигнал-шум в акустическом анализаторе спектра с использованием астигматической оптической системы для согласования размеров оптического и ультразвукового пучков. Усовершенствована методика расчета шумов в оптических системах с двумерными сигналами, не являющимися функциями с разделяющимися переменными. Показана возможность оптимизации схемы анализатора спектра для увеличения отношения сигнал-шум.

АКУСТООПТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗАТОР СПЕКТРА. АСТИГМАТИЧЕСКИЕ ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ. УВЕЛИЧЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ-ШУМ.

Шашихин В.Н., Богач Н.В., Чупров В.А. ВЫЧИСЛЕНИЕ КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СХЕМЫ ШИФРОВАНИЯ ДВУМЕРНЫХ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ tent-ОТОБРАЖЕНИЯ.

Представлены результаты моделирования алгоритма шифрования двумерных данных, использующего одномерное хаотическое отображение типа tent. Проведен сравнительный анализ качества шифрования по корреляционным функциям для различных вариантов модификации параметра симметрии отображения. Предложен алгоритм определения числа кластеров ключей и размерности пространства ключей для данного вида криптосистем.

ХАОТИЧЕСКАЯ КРИПТОГРАФИЯ. ДИНАМИЧЕСКИЙ ХАОС. ОДНОМЕРНЫЕ ОТОБРАЖЕНИЯ. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПО ОТКРЫТОМУ ТЕКСТУ.

Бурдаков С.Ф., Харалдин Н.А. ПЛАНИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОГРАММНЫХ ДВИЖЕНИЙ РОБОТОВ МЕТОДОМ КОНФИГУРАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА.

Рассмотрены алгоритмы синтеза программных движений робота в среде с препятствиями с активным участием оператора. Алгоритмы базируются на методе конфигурационного пространства, позволяющем существенно расширить возможности визуализации процесса синтеза. Приведены основные этапы решения задачи синтеза и расчетный пример, подтверждающий эффективность представленных алгоритмов.

РОБОТ. СРЕДА С ПРЕПЯТСТВИЯМИ. СИНТЕЗ ПРОГРАММ ДВИЖЕНИЯ. МЕТОД КОНФИГУРАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА. ОПЕРАТОР. ВИЗУАЛИЗАЦИЯ.

Шашихин В.Н., Богач Н.В., Чупров В.А. АНАЛИЗ КРИПТОСТОЙКОСТИ АЛГОРИТМОВ ШИФРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ХАОТИЧЕСКОГО ОТОБРАЖЕНИЯ ТИПА tent.

Проведен анализ основных показателей криптостойкости (таких, как чувствительность по открытому тексту, по ключу и т. д.) для алгоритма хаотического шифрования. Представлены результаты экспериментов, отражающие показатели криптостойкости хаотического алгоритма на основе одномерного хаотического отображения типа tent.

ХАОТИЧЕСКАЯ КРИПТОГРАФИЯ. ДИНАМИЧЕСКИЙ ХАОС. ОДНОМЕРНЫЕ ОТОБРАЖЕНИЯ. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПО ОТКРЫТОМУ ТЕКСТУ.



Григорьев Л.Ю., Заблочный А.А., Кудрявцев Д.В. ТЕХНОЛОГИЯ НАПОЛНЕНИЯ БАЗ ЗНАНИЙ ОНТОЛОГИЧЕСКОГО ТИПА.

Растущая роль интеллектуальных ресурсов в деятельности организаций усиливает потребность в создании эффективных баз знаний. Предложен язык наполнения онтологий для разработки баз знаний и программное средство, реализующее его. Особенность описанного языка и его программной реализации – сочетание иерархических списков элементов онтологии с визуальными средствами разметки этих элементов и с возможностью установления связей между двумя и более списками в таблицах. Дана схема соответствия предложенного языка элементам стандартного языка веб-онтологий OWL. Приведены результаты внедрения системы в бизнесе и органах государственной власти.

БАЗЫ ЗНАНИЙ. ОНТОЛОГИЯ. СТРУКТУРИРОВАНИЕ ЗНАНИЙ. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЗНАНИЙ. НАПОЛНЕНИЕ ОНТОЛОГИЙ. МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Аксенов К.А., Камельский В.Д. АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ БИЗНЕС-ПРОЦЕССА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СЕРВИСА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.

Представлены результаты анализа динамических моделей бизнес-процессов и аспекты разработки Интернет-сервиса имитационного моделирования.

БИЗНЕС-ПРОЦЕСС. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ИНТЕРНЕТ-СЕРВИС.

Писарев А.И., Костин Е.В. МЕТОД ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПЛАВКИ МЕДНОГО НИКЕЛЬСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ В ПЕЧАХ ВАНЮКОВА.

Предложен алгоритм оптимального управления процессом плавки медного никельсодержащего сырья в печах Ванюкова, основанный на методе динамического программирования Беллмана. Для построения многошагового процесса управления используется нейросетевая модель плавки в печах Ванюкова. Критерием оптимальности управления выбран минимум потерь цветных металлов в процессе плавки. Для уменьшения объема вычислений предложено ввести группировку состояний процесса по критерию потерь цветных металлов на фиксированный момент времени.

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ. ДИНАМИЧЕСКОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ БЕЛЛМАНА. НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ. ПЕЧЬ ВАНЮКОВА. КРИТЕРИЙ ОПТИМАЛЬНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ.

Недоводеев К.В. МЕТОД ГЕНЕРАЦИИ ГРАФОВ ПОТОКОВ ДАННЫХ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ СИНТЕЗЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ДЛЯ НЕОДНОРОДНЫХ МНОГОЯДЕРНЫХ ПРОЦЕССОРОВ.

Предложен новый метод генерации крупногранулярных графов потоков данных, представляющих параллельные программы, предназначенные для решения задач обработки больших числовых клеточных матриц на неоднородных многоядерных процессорах, построенных на базе подсистемы памяти с программируемым информационным обменом. Метод позволяет исключить временные расходы на динамическую генерацию фрагментов задачи и отслеживание зависимостей по данным по ходу выполнения программы, возникающие при использовании существующих подходов к построению пакетов прикладных программ.

ПАКЕТЫ ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ. МАКРОПОТОКОВЫЕ ГРАФЫ. НЕОДНОРОДНЫЕ МНОГОЯДЕРНЫЕ ПРОЦЕССОРЫ. ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ.

Черноруцкий И.Г. МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ВЫБОР НА ОСНОВЕ МЕТОДА t -УПОРЯДОЧЕНИЯ.

Построен метод, позволяющий на основе ординальной информации пользователя строить процедуры сокращения множества Парето многокритериальной задачи. Для непустого множества задач данный метод эффективнее известного метода P -упорядочения.

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ. МНОЖЕСТВО ПАРЕТО. МЕТОД ПОДИНОВСКОГО. МЕТОД t -УПОРЯДОЧЕНИЯ.

Белявский Г.И., Никоненко Н.Д. АЛГОРИТМ РАСЧЕТА БЕЗАРБИТРАЖНОЙ ЦЕНЫ ФИНАНСОВОГО ОБЯЗАТЕЛЬСТВА НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ЛЕВИ.

Решена задача вычисления условного математического ожидания. Для приближенного решения данной задачи использован прием под названием «Дискретизация по состоянию процесса Леви».

УСЛОВНОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОЖИДАНИЕ. ПРОЦЕСС ЛЕВИ. ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКАЯ ФУНКЦИЯ. ДИСКРЕТИЗАЦИЯ ПО СОСТОЯНИЮ ПРОЦЕССА ЛЕВИ. БЕЗАРБИТРАЖНАЯ ЦЕНА ФИНАНСОВОГО ОБЯЗАТЕЛЬСТВА.

Мазин В.Д. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ВЕЛИЧИНЫ В ПСЕВДОЕВКЛИДОВОЙ ПЛОСКОСТИ.

Предложено представление физической величины вектором псевдоевклидовой плоскости, включающее наряду со значением величины степень его неопределенности. Обсуждены четыре новые сущности, возникающие при таком представлении.

ПСЕВДОЕВКЛИДОВА ПЛОСКОСТЬ. НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ. ВЕКТОР ЕДИНИЦЫ. ПОЛНЫЙ ВЕКТОР. ПСЕВДОЕВКЛИДОВ УГОЛ.

Черноруцкий И.Г. ФУНКЦИИ РЕЛАКСАЦИИ ГРАДИЕНТНЫХ МЕТОДОВ.

Разработан аппарат функций релаксации (ФР), позволяющий производить анализ матричной градиентной схемы компьютерной оптимизации. Аналитическая связь между ФР и матричным множителем в градиентном методе дает возможность по заданной ФР строить соответствующий метод оптимизации с заданными релаксационными свойствами. По существу предложен «генератор» новых методов градиентного типа.

МАТРИЧНЫЕ ГРАДИЕНТНЫЕ МЕТОДЫ. ФУНКЦИИ РЕЛАКСАЦИИ. УСЛОВИЯ РЕЛАКСАЦИОННОСТИ.

Бурлов В.Г., Зенина Е.А., Матвеев А.В. СИНТЕЗ МОДЕЛИ И СПОСОБОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ КОНФЛИКТА.

Рассмотрен подход к разрешению конфликта с позиции принципа системности. Получена математическая формализация синтеза системы, достигающей своего целевого предназначения в условиях противодействия.

КОНФЛИКТ. МОДЕЛИРОВАНИЕ. СИНТЕЗ СИСТЕМЫ. ЭФФЕКТИВНОСТЬ. ПРИНЦИП СИСТЕМНОСТИ.

Стяпшин А.А. ОНТОЛОГИЧЕСКИЙ ПОХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ГОРОДСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ.

Представлен онтологический подход к моделированию инфраструктуры городского хозяйства. Проведено обобщение и систематизация данных в области городской инфраструктуры, определения базы для построения ее онтологии.

ГОРОД. ИНФРАСТРУКТУРА. ОНТОЛОГИЯ.

Ходырев И.А., Попова С.В. ОБНАРУЖЕНИЕ РАЗВИЛОК В МОДЕЛЯХ ПРОЦЕССОВ.

Рассмотрена проблема поиска развилок в моделях процессов применительно к задаче математического моделирования с использованием журналов событий. Проведен анализ существующего подхода, описаны алгоритмы, позволяющие его улучшить.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ. ЖУРНАЛЫ СОБЫТИЙ. РАЗВИЛКИ ПРОЦЕССА. СЕТИ ПЕТРИ.

Квятковская И.Ю., Сибикина И.В. ЭНТРОПИЙНЫЙ ПОДХОД В ЗАДАЧЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СИСТЕМНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛИ КОМПЕТЕНЦИИ.

Рассмотрена модель компетенции. Выделены две системные характеристики: целостность компетенции и важность дисциплин. Предложен информационный подход расчета количественных значений системных характеристик модели компетенции.

КОМПЕТЕНЦИЯ. ГРАФОВАЯ МОДЕЛЬ. ЭНТРОПИЯ. СТЕПЕНЬ ВАЖНОСТИ ДИСЦИПЛИН.

Рыбак В.А. АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ.

Описана методология управления качеством окружающей среды, состоящая из методик оценки влияния антропогенного воздействия на природную среду урбанизированных территорий, научно-методических принципов создания и использования средств поддержки принятия решений и методики расчета эколого-экономической эффективности природоохранных мероприятий. Применение предложенных методов позволяет обеспечить устойчивое и экологически безопасное природопользование.

ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА. АНТРОПОГЕННОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ. УПРАВЛЕНИЕ. ГЕНЕТИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИРОДООХРАННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ.

Ханова А.А. КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ СТРУКТУРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЕМ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ (НА ПРИМЕРЕ ГРУЗОВОГО ПОРТА).

Описана концептуальная структура управления предприятием на основе методов индикационного анализа, двойного контура управления на основе мультиаспектных интегрированных моделей. Показана возможность интеграции и конвергенции онтологической, процессной, имитационной, ситуационной, когнитивной моделей. Отмечено их место в схеме разработки управленческих решений в грузовом порту.

СТРУКТУРА УПРАВЛЕНИЯ. УПРАВЛЕНЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ. МУЛЬТИАСПЕКТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ. ГРУЗОВОЙ ПОРТ.

Кригер Л.С., Квятковская И.Ю. ФОРМАЛИЗАЦИЯ ТИПОВЫХ СИТУАЦИЙ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА.

Рассмотрена задача управления движением общественного транспорта и повышение его эффективности. Предложен подход нечеткого ситуационного управления движением общественного транспорта на основе нечеткого включения ситуаций.

НЕЧЕТКОЕ СИТУАЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ. НЕЧЕТКАЯ СИТУАЦИЯ. УПРАВЛЕНИЕ. НЕЧЕТКАЯ СИТУАЦИОННАЯ СЕТЬ.

Голуб Ю.А., Новиков А.О., Логинова Д.А. АНАЛИЗ ПРИНЦИПОВ ФОРМИРОВАНИЯ БАЗ ДАННЫХ ДЛЯ МОНИТОРИНГА И ОЦЕНКИ ПРОЦЕССОВ НАУКОЕМКОГО КЛАСТЕРНОГО РАЗВИТИЯ.

Рассмотрены основные принципы разработки баз данных и свойства управления ими. Изучены проблемы, связанные с формированием базы данных для мониторинга и оценки процессов наукоемкого кластерного развития.

БАЗА ДАННЫХ. ПОКАЗАТЕЛИ. МОНИТОРИНГ. ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ.

ABSTRACTS

KEYWORDS

Rogov S.A., Sergeev D.S., Skorohod V.V. INCREASE SIGNAL-TO-NOISE RATIO IN ACOUSTO-OPTIC SPECTRUM ANALYZER WITH USE ASTIGMATIC OPTICS.

Shows the calculation of signal to noise ratio in acoustooptic spectrum analyzer with use astigmatic optical system to match the size of optical and ultrasonic beams. Improved method for calculating noise in optical systems with two-dimensional signals that are not functions with separable variables. The possibility of optimizing scheme of the spectrum analyzer to increase signal to noise ratio.

ACOUSTO-OPTIC SPECTRUM ANALYZER. ASTIGMATIC OPTICAL SYSTEM. INCREASE SIGNAL-TO-NOISE RATIO.

Shashikhin V.N., Bogach N.V., Chuprov V.A. A CALCULATION OF CRYPTOGRAPHIC PROPERTIES FOR AN ENCRYPTION ALGORITHM USING CHAOTIC tent MAP.

Cryptographic properties calculation based on auto and cross correlation functions is proposed. The key space, number of rounds and symmetry parameter dependencies are analyzed. An algorithm to calculate the key clusters is given.

CHAOS-BASED CRYPTOSYSTEM. DYNAMICAL CHAOS. tent MAP. KEY SPACE DIMENSION. CORRELATION PROPERTY.

Burdakov S.F., Kharaldin N.A. PLANNING AND OPTIMIZATION OF ROBOT PROGRAM MOTION BY METHOD OF CONFIGURATION SPACE.

An algorithm for the synthesis of robot motion in an environment of obstacles with the active participation of the operator is considered. The algorithm is based on the method of configuration space, which allows significantly expand the ability of visualization the process of synthesis. The basic steps of the synthesis solution and the current sample, confirming the effectiveness of the algorithms are presented.

ROBOT. ENVIRONMENT WITH OBSTACLES. SYNTHESIS OF MOTION PROGRAM. METHOD OF CONFIGURATION SPACE. OPERATOR. VISUALIZATION.

Shashikhin V.N., Bogach N.V., Chuprov V.A. AN ENCRYPTION ALGORITHM USING CHAOTIC tent MAP SECURITY EVALUATION.

A general security evaluation guideline is given for cryptosystems using simple chaotic maps. We provide the experimental results to reveal the details for tent map cryptosystem features estimation (such as avalanche property and key dimension).

CHAOS-BASED CRYPTOSYSTEM. DYNAMICAL CHAOS. tent MAP. AVALANCHE PROPERTY. SECURITY EVALUATION.



Grigoriev L.Yu., Zablotsky A.A., Kudryavtsev D.V. THE TECHNOLOGY FOR ONTOLOGY INSTANCE DATA AUTHORIZING.

Ontologies and semantic web technologies are the leading means for knowledge-base development nowadays. The article suggests the classifiers and matrix language for ontology instance data authoring together with corresponding software. The language and tool allow users to visualize hierarchical relationships between ontology individuals, to distinguish instance types using icons and to represent links between elements from hierarchical list using matrix. The article also maps the suggested language to web ontology language (OWL), provides mechanism for knowledge-base editor interface design, lists implementation examples and makes evaluation of the suggested technology.

KNOWLEDGE BASE. ONTOLOGY. ONTOLOGY POPULATION. A-BOX. KNOWLEDGE REPRESENTATION. KNOWLEDGE STRUCTURING. INSTANCE DATA.

Aksyonov K.A., Kamelskiy V.D. THE ANALYSIS OF BUSINESS PROCESSES DYNAMIC MODELS FOR DEVELOPMENT OF SIMULATION SERVICE.

In this work is considered the analysis of business processes dynamic models and development of simulation Internet service.

BUSINESS PROCESS. SIMULATION. INTERNET SERVICE.

Pisarev A.I., Kostin E.V. THE METHOD OF OPTIMAL CONTROL OF THE SMELTING PROCESS OF COPPER NICKEL-CONTAINING RAW MATERIALS IN FURNACES VANYUKOV.

In this paper we propose an algorithm of optimal control of melting process of copper nickel raw material in furnaces Vanyukov based on the method of Bellman's dynamic programming. To construct a multi-step management process developed by the authors used neural network model of the melting furnaces Vanyukov. The criterion selected for optimality for a minimum loss of non-ferrous metals smelting process. To reduce the amount of calculations the authors propose to enter the grouping of states of the process by loss of non-ferrous metals at a fixed time.

OPTIMAL CONTROL. DYNAMIC PROGRAMMING. BELLMAN. NEURAL NETWORK MODEL. THE FURNACE VANYUKOV. THE CRITERION FOR OPTIMAL CONTROL.

Nedovodeev K.V. A MACRO-FLOW GRAPH GENERATION TECHNIQUE, SUPPORTING AUTOMATIC SYNTHESIS OF PARALLEL PROGRAMS FOR HETEROGENEOUS MULTICORE PROCESSORS.

A new technique for generation of coarse-grained dataflow graphs is proposed. The graphs mentioned represent parallel programs, processing large blocked numerical matrices on heterogeneous multicore processors with explicitly-managed memory hierarchies. The technique proposed allows removing of overheads related to dynamic tasks generation and data dependency tracking, which arise when existing approaches to software library construction are used.

SOFTWARE LIBRARIES. MACRO-FLOW GRAPHS. HETEROGENEOUS MULTICORE PROCESSORS. PARALLEL PROGRAMMING.

Chernorytsky I.G. MULTI OBJECTIVE SELECTION BASED ON t -SORTING METHOD.

Method making possible to build a procedure of reduction of Pareto multitude of multi objective task on the base of user's ordinal information is proposed. This method is more efficient then well known P-sorting method for a nonempty set of tasks.

MULTI OBJECTIVE OPTIMIZATION. PARETO MULTITUDE. t -SORTING METHOD. PODINOVSKI METHOD

Belyavsky G.I., Niconenko N.D. COMPUTATION ALGORITHM OF ARBITRAGE FREE PRICE OF FINANCIAL COMMITMENT BASED ON UP TO STATE SAMPLING OF LEVY PROCESSES.

The problem of computation of conditional expectation is solved. We use method which is called «Up to state sampling of Levy process» for the approximate solution.

CONDITIONAL EXPECTATION. LEVY PROCESS. THE CHARACTERISTIC FUNCTION. UP TO STATE SAMPLING OF LEVY PROCESS. ARBITRAGE FREE PRICE OF FINANCIAL COMMITMENT.

Mazin V.D. A PRESENTATION OF A PHYSICAL QUANTITY IN THE PSEUDO-EUCLIDEAN PLANE.

A presentation of a physical quantity by a vector of the pseudo-Euclidean plane including on a level with the quantity value its degree of uncertainty is proposed. 4 new matters appearing by such presentation are discussed.

PSEUDO-EUCLIDEAN PLANE. UNCERTAINTY. VECTOR OF THE UNIT. TOTAL VECTOR. PSEUDO-EUCLIDEAN ANGLE.

Chernorytsky I.G. RELAXATION FUNCTION OF GRADIENT METHODS.

Set of relaxation functions (RF) for analysis of matrix gradient scheme of computer optimization is developed. Analytic dependence between RF and matrix factor of gradient scheme allows constructing of optimization method with determined relaxation properties corresponding to given RF. Generally speaking, this is a «generator» of new gradient-type methods.

MATRIX GRADIENT SCHEME. RELAXATION FUNCTIONS. RELAXATION ABILITY CONDITIONS.

Burlov V.G., Zenina E.A., Matveev A.V. THE SYNTHESIS OF THE MODEL AND THE METHODS OF FUNCTIONING OF THE SYSTEM IN CONFLICT SITUATIONS.

In this article authors considered the method by solution of conflict with position of the principle of systematic. There was received the mathematical formalization of the synthesis of system which reach the target destination in the conditions of opposition.

CONFLICT. MODELLING. SYNTHESIS OF SYSTEM. EFFICIENCY. PRINCIPLE OF SYSTEMATIC.

Staypshin A.A. THE ONTOLOGIC CAMPAIGN TO MODELLING OF THE CITY INFRASTRUCTURE.

In article the ontologic approach to modelling of an infrastructure of municipal economy is presented. The work purpose were generalization and ordering of the data in the field of a city infrastructure, definition of base for construction of its ontology.

CITY. INFRASTRUCTURE. ONTOLOGY.

Khodyrev I.A., Popova S.V. SEARCHING FOR FORKS IN PROCESS MODELS.

In presented paper authors focus on the problem of searching forks in process models for the task of simulation using logs of information systems. The analysis of modern approach is given and the improvement of algorithms is proposed.

PROCESS MINING. LOG. PETRI NETS. DECISION POINTS.

Kvyatkovskaya I.Yu., Sibikina I.V. THE ENTROPIC APPROACH IN THE PROBLEM OF SYSTEMIC CHARACTERISTIC DETERMINATION OF COMPETENCE MODEL.

The problem deals with the model of competence. Two systemic characteristic of the model are singled out in the research work: integrity of the competence and significance of this branch of science. An informational approach to calculating quantitative meanings of systemic characteristic of competence was suggested.

COMPETENCE. GRAPHS' MODEL. ENTROPY. DEGREE OF IMPORTANCE OF DISCIPLINES.

Rybak V.A. ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF THE ANTHROPOGENIC INFLUENCE ON THE ENVIRONMENT.

In article the methodology of quality management of the environment, consisting of techniques of an estimation of influence of anthropogenic influence on an environment of the urbanized territories, scientifically-methodical principles of creation and use of means of support of decision-making and a technique of calculation of ecological-economic efficiency of nature protection actions is described. Application of the offered methods allows to provide steady and ecologically safe wildlife management.

ENVIRONMENT. ANTHROPOGENOUS INFLUENCE. MANAGEMENT. GENETIC ALGORITHMS. EFFICIENCY OF NATURE PROTECTION ACTIONS.

Khanova A.A. CONCEPTUAL STRUCTURE OF BUSINESS MANAGEMENT ON THE BASIS OF MULTIASPECT MODELLING (ON THE EXAMPLE OF CARGO PORT).

The conceptual structure of business management on the basis of methods of the indicator analysis, a double contour of management on the basis of the multiaspect integrated models is described. Possibility of integration and convergence of ontologic, process, imitating, situational, cognitive models is shown. And their place in the scheme to development of management decisions in cargo port.

MANAGEMENT STRUCTURE. MANAGEMENT DECISION. MULTIASPECT MODELLING. CARGO PORT.



Kruger L.S., Kvyatkovskaya I.Yu. FORMALIZATION OF STANDARD SITUATIONS IN PROBLEMS OF TRAFFIC CONTROL OF PUBLIC TRANSPORT.

In article consider the problem of traffic of public transport and increase its effectiveness. An approach of fuzzy situational control movement of public transport on the basis of fuzzy inclusion situations.

FUZZY CASE MANAGEMENT. FUZZY SITUATION MANAGEMENT. FUZZY SITUATION NETWORK.

Novikov A.O., Golub Yu.A., Loginova D.A. PRINCIPLES OF FORMATION OF DATABASE FOR MONITORING AND EVALUATION PROCESS OF SCIENCE CLUSTER DEVELOPMENT.

In article main principles of working out of databases and property by managements of them are considered. The problems connected with formation of a database for monitoring and an estimation of processes high technology cluster of the development are considered.

DATABASE. INDICATORS. MONITORING. PRINCIPLE OF CONSTRUCTION.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕДОМОСТИ СПбГУ

№ 3 (150) 2012

Учредитель – Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Издание зарегистрировано в Госкомпечати РФ, свидетельство № 013165 от 23.12.94

Редакция журнала

канд. техн. наук, д-р экон. наук, профессор *А.В. Бабкин* – научный редактор

Е.А. Калинина – литературный редактор, корректор

Г.А. Пышкина – ответственный секретарь, выпускающий редактор

Телефон редакции 552-62-16, 297-18-21

E-mail: infocom@spbstu.ru

Компьютерная верстка *А.Н. Смирнов*

Директор Издательства Политехнического университета *А.В. Иванов*

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97

Подписано в печать 27.06.2012. Формат 60×84 1/8. Бум. тип. № 1.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 14,88. Уч.-изд. л. 14,88. Тираж 1000. Заказ

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
Издательство Политехнического университета
член Издательско-полиграфической ассоциации университетов России
Адрес университета и издательства: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29.