



CONTROL SCIENCES

**Научно-технический
журнал**

6 номеров в год
ISSN 1819-3161

УЧРЕДИТЕЛЬ

Учреждение Российской
академии наук

Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН

Главный редактор

Д.А. Новиков

**Заместители главного
редактора**

Л.П. Боровских, Ф.Ф. Пащенко

Редактор

Т.А. Гладкова

Выпускающий редактор

Л.В. Петракова

Издатель

ООО «СенСиДат-Контрол»

Адрес редакции
117997, ГСП-7, Москва,
ул. Профсоюзная, д. 65, к. 410.
Тел./факс (495) 334-92-00

E-mail: pu@ipu.ru

Интернет: http://pu.mtas.ru

Оригинал-макет
и электронная версия
подготовлены
ООО «Авансд Солюшнз»

Отпечатано в ИПУ РАН

Фото на четвертой странице обложки
В.М. Бабинова

Заказ № 38

Подписано в печать
22.03.2010 г.

Журнал зарегистрирован
в Министерстве Российской
Федерации по делам печати,
телерадиовещания и средств
массовых коммуникаций

Свидетельство о регистрации
ПИ №77-11963 от 06 марта 2002 г.

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

Подписные индексы:
80508 и **81708** в каталоге Роспечати
38006 в объединенном каталоге
«Пресса России»

Цена свободная

© Учреждение Российской
академии наук
Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

2.2010

СОДЕРЖАНИЕ

Анализ и синтез систем управления

- Цыкунов А.М.** Робастное управление линейными сингулярно-возмущенными объектами 2
- Шумский А.Е., Жирабок А.Н., Бобко Е.Ю.** Метод отказоустойчивого управления нелинейными динамическими системами: логико-динамический подход 11
- Дударенко Н.А., Полякова М.В., Ушаков А.В.** Экспресс-оценка склонности сложных динамических систем к вырождению 19

Управление в социально-экономических системах

- Иванова Н.В., Ключков В.В.** Экономические проблемы управления высокорисковыми инновационными проектами в наукоемкой промышленности. 25
- Попов Е.В., Шматов Г.А.** Вычисление охвата СМИ 34
- Оленев С.Е.** Система стимулирования трудовых ресурсов при производстве изделий новой техники 39
- Суслов С.А., Кондратьев М.А., Сергеев К.В.** Агентное моделирование как средство анализа и прогноза спроса на энергоресурсы 46

Информационные технологии в управлении

- Берман А.Ф., Николайчук О.А.** Модели, знания и опыт для управления технологической безопасностью. 53

Управление технологическими процессами

- Сидоров А.А., Захарченко В.Е.** Оценка достоверности значений параметров АСУТП с помощью синхронных моделей 61

Управление подвижными объектами

- Андрienко А.Я., Тропова Е.И.** Алгоритмы быстрого оценивания вектора высокой размерности в задачах управления подвижными объектами. 69

Хроника

- Управление инновациями: модернизация на фоне кризиса** 74
- XVII международная конференция «Проблемы управления безопасностью сложных систем»**. 78
- Александр Семенович Рыков** (к 65-летию со дня рождения) 83

* * *

- Contents and abstracts**. 84

РОБАСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЛИНЕЙНЫМИ СИНГУЛЯРНО-ВОЗМУЩЕННЫМИ ОБЪЕКТАМИ¹

А.М. Цыкунов

Решена задача управления линейным объектом, математическая модель которого описывается сингулярно-возмущенными дифференциальными уравнениями с априорно неизвестными параметрами. Получены алгоритмы управления, обеспечивающие компенсацию параметрических и внешних возмущений с требуемой точностью, а также условия, когда исходную модель можно декомпозировать путем выделения быстрой и медленной составляющих. Полученные результаты проиллюстрированы числовым примером.

Ключевые слова: робастное управление, наблюдатель производных, сингулярно-возмущенная система, вектор состояния, вспомогательный контур.

ВВЕДЕНИЕ

Трудности решения прикладных задач проектирования систем управления зачастую связаны со сложностью математических моделей объектов управления, а также с отсутствием информации о точных значениях их параметров. Для упрощения процедуры синтеза алгоритмов управления эффективно применяются различные методы декомпозиции [1], когда исходная математическая модель разделяется на более мелкие и простые, для которых автономно решаются необходимые задачи и тем самым в совокупности обеспечивается решение исходной проблемы. Один из таких методов состоит в декомпозиции, основанной на разделении разнотемповых движений. В результате получается сингулярно-возмущенная система дифференциальных уравнений. Задачи адаптивного управления объектами такого класса в условиях неопределенности исследованы в работах [1, 2], а оптимального управления — в работе [3]. В статье [2] выполнен анализ свойств устойчивости возмущенной нелинейной системой, когда в качестве паразитной динамики принимаются быстрые составляющие.

Применение такого способа декомпозиции требует решения вопроса, какие составляющие мож-

но считать быстрыми, чтобы алгоритм управления, синтезированный по упрощенной модели, был работоспособен для исходной системы.

В настоящей статье решается задача проектирования робастной системы управления объектом, для которого осуществлена декомпозиция математической модели на быстрые и медленные составляющие. Алгоритм управления получается с использованием редуцированной модели, и определяются условия, которым должны удовлетворять уравнения быстрых составляющих, чтобы система не потеряла работоспособности.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим объект управления, математическая модель которого в результате декомпозиции описывается системой дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + B\sigma(t) + Df(t), \quad y(t) = Lx(t), \\ \theta \dot{z}(t) &= Fz(t) + bu(t), \quad \sigma(t) = qz(t),\end{aligned}\quad (1)$$

где $x \in R^{n_1}$, $z \in R^{n_2}$ — векторы состояния медленных и быстрых составляющих соответственно, $y \in R$ и $u \in R$ — регулируемая переменная и управляющее воздействие, $\sigma \in R$ — выходной сигнал модели быстрых составляющих, $f(t)$ — внешнее возмущающее воздействие, $\theta > 0$ — малый параметр, A , B ,

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 09-08-00237).



D, L, F, b и q — числовые матрицы соответствующих порядков.

Требуется спроектировать систему слежения за эталонным сигналом $y_m(t)$ в условиях неопределенности параметров модели (1), чтобы было выполнено целевое условие

$$|y(t) - y_m(t)| < \delta \quad \text{при } t > T, \quad (2)$$

где $\delta > 0$, T — время, по истечении которого с начала работы системы должно выполняться неравенство (2). Кроме того, будем считать, что производные входных и выходных сигналов, а также возмущение не измеряются, и в алгоритме управления не должны использоваться переменные быстрых составляющих $\sigma(t)$ и $z(t)$. Будем решать сформулированную задачу при следующих *предположениях*.

- Элементы матриц A, B, D, L, F, b и q принадлежат известному ограниченному множеству возможных значений Ξ .
- Пары (AB) и (Fb) — управляемы, (AL) и (Fq) — наблюдаемы.
- Передаточные функции $L(\lambda I - A)^{-1}B = kR(\lambda)/Q(\lambda)$, $q(\lambda I - F)^{-1}b = \alpha(\lambda)/\beta(\lambda)$ минимально фазовые, полином $\beta(\lambda)$ — гурвицев, где λ — комплексная переменная в преобразовании Лапласа, многочлены $R(\lambda)$, $Q(\lambda)$, $\beta(\lambda)$ нормированы, I — единичная матрица соответствующего порядка, $k > 0$.
- Матрица F не вырождена.
- Известны порядки многочленов $\deg Q(\lambda) = n_1$, $\deg R(\lambda) = m_1$, $\gamma = n_1 - m_1$, $\deg \beta(\lambda) = n_2$, $\deg \alpha(\lambda) = m_2$.
- Внешнее воздействие $f(t)$ и эталонный сигнал $y_m(t)$ — гладкие ограниченные функции. Возмущение является неизмеряемой переменной.

2. МЕТОД РЕШЕНИЯ

Решение сформулированной задачи состоит из двух этапов.

1. Составляется редуцированная модель объекта управления, для чего полагаем, что $\theta = 0$ в уравнении (1):

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B\chi u(t) + Df(t), \quad y(t) = Lx(t),$$

$$F\bar{z}(t) + bu(t) = 0, \quad \sigma(t) = q\bar{z}(t), \quad \chi = -qF^{-1}b. \quad (3)$$

Для модели (3) проектируется алгоритм управления, обеспечивающий выполнение целевого неравенства (2).

Обосновывается работоспособность полученной системы управления для исходной модели (1) и выясняются ограничения, которым должна удовлетворять величина θ , чтобы для замкнутой системы было выполнено условие (2) для любых значений параметров модели из заданного класса неопределенности.

Преобразуем первое из уравнений (3) в эквивалентное уравнение относительно регулируемой переменной $y(t)$:

$$Q(P)y(t) = k_0 R(P)u(t) + K(P)f(t). \quad (4)$$

Здесь $k_0 = k\chi$, $P = d/dt$ — оператор дифференцирования, $Q(P)$, $R(P)$ и $K(P)$ — линейные дифференциальные операторы порядков n_1 , m_1 и k_1 соответственно.

Используя хорошо известную процедуру [3], преобразуем уравнение (4):

$$Q_m(P)y(t) = k_0 \left(u(t) + \frac{N_1(P)}{M(P)} u(t) + \frac{N_2(P)}{M(P)} y(t) + \frac{S(P)K(P)}{M(P)} f(t) \right) + v(t). \quad (5)$$

Здесь $Q_m(\lambda)$, $M(\lambda)$ и $S(\lambda)$ — гурвицевы многочлены степени γ , $n_1 - 1$ и $\gamma - 1$ соответственно, $\deg N_1(P) = n_1 - 2$, $\deg N_2(P) = n_1 - 1$, $v(t)$ — функция, которая мажорируется затухающей экспонентой.

Далее воспользуемся результатами [4] и положим $u(t) = \alpha_0 \vartheta(t)$, где $\alpha_0 > 0$, $\vartheta(t)$ — управляющее воздействие. Составим уравнение для ошибки $e(t) = y(t) - y_m(t)$, принимая во внимание уравнение (5):

$$Q_m(P)e(t) = k_0 \alpha_0 \vartheta(t) + \varphi(t), \quad (6)$$

$$\text{где } \varphi(t) = \frac{k_0 N_1(P)}{M(P)} u(t) + \frac{k_0 N_2(P)}{M(P)} y(t) + \frac{k_0 S(P)K(P)}{M(P)} f(t) - Q_m(P)y_m(t) + v(t).$$

Введем вспомогательный контур, динамические процессы в котором описываются уравнением

$$Q_m(P)\bar{e}(t) = \beta_0 \vartheta(t). \quad (7)$$

Вычитая уравнение (7) из уравнения (6), получим уравнение для сигнала рассогласования $\zeta(t) = e(t) - \bar{e}(t)$:

$$Q_m(P)\zeta(t) = \psi(t), \quad \psi(t) = (k_0 \alpha_0 - \beta_0) \vartheta(t) + \varphi(t). \quad (8)$$

Таким образом, сигнал $\varsigma(t)$ несет информацию обо всех возмущениях, которые присутствуют в системе $\psi(t)$. Назовем эту переменную обобщенным возмущением. Принимая во внимание, что производные входных и выходных переменных не измеряются, будем формировать сигнал управления $\vartheta(t)$ в виде

$$\vartheta(t) = -\frac{1}{\beta_0} g_m^T \xi(t), \quad (9)$$

где $\xi^T(t) = [\bar{\varsigma}(t), \bar{\varsigma}'(t), \dots, \bar{\varsigma}^\gamma(t)]$, $\bar{\varsigma}^i(t)$ — оценка i -й производной сигнала $\varsigma(t)$, g_m — вектор, компонентами которого являются коэффициенты оператора $Q_m(P)$, записанные в обратном порядке. Вектор $\xi(t)$ получается с помощью наблюдателя производных [5]

$$\begin{aligned} \dot{\xi}(t) &= \Gamma_0 \xi(t) + d_0(\varsigma(t) - \bar{\varsigma}(t)), \\ \bar{\varsigma}(t) &= L_1 \xi(t). \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь $\varsigma(t) \in R^{\gamma+1}$, $\Gamma_0 = \begin{bmatrix} 0 & I_\gamma \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $d_0 = \begin{bmatrix} d_1 \\ \mu \end{bmatrix}, \dots, \begin{bmatrix} d_{\gamma+1} \\ \mu^{\gamma+1} \end{bmatrix}$, $L_1 = [1, 0, \dots, 0]$, числа $d_1, \dots, d_{\gamma+1}$ выбираются так, чтобы матрица $\Gamma = \Gamma_0 + \bar{d} L_1$ была гурвицевой, $\bar{d} = [d_1, \dots, d_{\gamma+1}]$, $\mu > 0$ — достаточно малая величина. Отметим, что порядок уравнения (10) на единицу больше, чем это необходимо при реализации. Это сделано для упрощения преобразований при доказательстве работоспособности.

Условия работоспособности полученного алгоритма управления для редуцированной модели объекта управления (3) можно сформулировать следующим образом.

Утверждение 1 [4]. Если полином $R(\lambda)$ гурвицев, $k_0 > 0$, а возмущение $f(t)$ и эталонный сигнал $y_m(t)$ — гладкие ограниченные функции, то для любого числа $\delta > 0$ существуют числа α_0, β_0, μ_0 такие, что при $\mu < \mu_0$ алгоритм управления, состоящий из вспомогательного контура (7), наблюдателя производных (10) и устройства, реализующего формулу (9), обеспечивает выполнение неравенства (2) при $t > T$, и все сигналы в замкнутой системе ограничены. ♦

Доказательство имеется в статье [4], поэтому здесь не приводится.

Для анализа работоспособности полученного алгоритма управления для исходной модели объекта управления введем вектор отклонений для

быстрых составляющих $\Delta z(t) = z(t) - \bar{z}(t) = z(t) + F^{-1}bu(t)$. Тогда из второго из уравнений (1) будем иметь

$$\begin{aligned} \Delta \dot{z}(t) &= \frac{1}{\theta} F \Delta z(t) + F^{-1}b\dot{u}(t), \\ \sigma(t) &= qz(t) = q\Delta z(t) + \chi u(t). \end{aligned} \quad (11)$$

Подставив значение $\sigma(t)$ в первое уравнение (1), получим

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + B\chi u(t) + Bq\Delta z(t) + Df(t), \\ y(t) &= Lx(t). \end{aligned}$$

В результате преобразований, аналогичных осуществленным при получении уравнения (6), будем иметь уравнение для ошибки не редуцированной системы:

$$Q_m(P)e(t) = \beta_0 \vartheta(t) + \bar{\psi}(t), \quad (12)$$

где $\bar{\psi}(t) = \psi(t) + \frac{S(P)R(P)}{M(P)} q\Delta z(t)$. Тогда уравнение для сигнала рассогласования (8) будет иметь вид

$$Q_m(P)\varsigma(t) = \bar{\psi}(t). \quad (13)$$

Вектор управления $\vartheta(t)$ формируется в соответствии с формулой (9) и в редуцированной системе компенсирует обобщенное возмущение $\psi(t)$. В уравнении (13) появляется еще одна составляющая $\frac{S(P)R(P)}{M(P)} q\Delta z(t)$, ограниченность которой нельзя гарантировать. Следовательно, либо необходимо доказать, что эта компонента ограничена, и тогда полученный алгоритм управления будет работоспособен для не редуцированной модели (1), либо выяснить условия, которые обеспечивали бы ограниченность этой составляющей. Иными словами, требуется выяснить условия работоспособности алгоритма управления для исходной модели (1), хотя он был спроектирован для редуцированной модели (3).

Введем вектор $\xi_0^T(t) = [\varsigma(t), \varsigma'(t), \dots, \varsigma^\gamma(t)]$ и составим уравнение для нормированного вектора ошибок оценивания производных, принимая во внимание выражение (10):

$$\begin{aligned} \eta(t) &= T^{-1}(\xi(t) - \xi_0(t)), \quad T = \text{diag}\{\mu^\gamma, \dots, \mu, 1\}, \\ \dot{\eta}(t) &= \frac{1}{\mu} \Gamma \eta(t) - b_1 \varsigma^{\gamma+1}(t), \\ \varsigma(t) - \bar{\varsigma}(t) &= \mu^\gamma L_1 \eta(t), \end{aligned} \quad (14)$$



где $b_1^T = [0, \dots, 0, 1]$. Подставим значение переменной $\vartheta(t)$ из формулы (9) в уравнения (11) и (12), принимая во внимание выражения (10) и (14), а после подстановки преобразуем уравнение (12) в векторно-матричную форму

$$\Delta \dot{z}(t) = \frac{1}{\theta} F \Delta z(t) - F^{-1} b \frac{\alpha_0}{\beta_0} g_m^T (\Gamma_0 \xi(t) + d_0 \mu^T L_1 \eta(t)), \quad (15)$$

$$\dot{\varepsilon} = A_m \varepsilon(t) - b_1 T \eta(t), \quad e(t) = L_1 \varepsilon(t).$$

Утверждение 2. Пусть выполнены условия предположений и существует число θ_0 , такое, что решением матричного уравнения

$$HF + F^T H + 2\theta_0 HGH = \frac{\theta_0}{\mu} I \quad (16)$$

является положительно определенная матрица H , где $G = F^{-1} b \frac{\alpha_0}{\beta_0} g_m^T (F^{-1} b \frac{\alpha_0}{\beta_0} g_m^T)^T$. Тогда при $\theta < \theta_0$ система управления, состоящая из вспомогательного контура (7), наблюдателя производных (10) и устройства, реализующего формулу (9), обеспечивает выполнение целевого условия (2) для модели объекта управления (1). ♦

Доказательство приведено в Приложении.

Отметим, что условие (16) справедливо только для приведенного алгоритма управления и является довольно грубым, но оно гарантирует, что не редуцированная система будет работоспособна для любых параметров модели из заданного класса неопределенности Ξ , что будет проиллюстрировано в примере. Величина θ_0 , удовлетворяющая условию (16) является оценкой параметра θ , при котором второе из уравнений (1) описывает быстрые составляющие для выбранных параметров алгоритма управления.

3. ОБОБЩЕНИЕ ДЛЯ МНОГОСВЯЗНЫХ ОБЪЕКТОВ

Рассмотрим многосвязный объект управления, математическая модель которого подвергнута декомпозиции

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= A_i x_i(t) + B_i \sigma_i(t) + D_i f_i(t), \quad y_i(t) = L_i x_i(t), \\ \theta_i \dot{z}_i(t) &= F_i z_i(t) + \sum_{j=1, i=1}^{\pi} C_{ij} y_j(t) + b_i u_i(t), \\ \sigma_i(t) &= q_i z_i(t), \quad i = 1, \dots, \pi. \end{aligned} \quad (17)$$

Здесь π — число локальных подсистем, $x_i \in R^{n_{1i}}$ и $z_i \in R^{n_{2i}}$ — векторы состояния медленных и быстрых составляющих локальных подсистем соответственно, $y_i \in R$, $u_i \in R$ — регулируемые переменные и управляющие воздействия, $\sigma_i \in R$ — выходные сигналы модели быстрых составляющих, $f_i(t)$ — внешние возмущающие воздействия, $\theta_i > 0$ — малые параметры, $A_i, B_i, D_i, L_i, F_i, b_i$ и q_i — числовые матрицы соответствующих порядков, C_{ij} — числовые матрицы перекрестных связей.

Требуется спроектировать децентрализованную систему управления, обеспечивающую выполнение следующих целевых условий:

$$|y_i(t) - y_{mi}(t)| < \delta \text{ при } t > T, \quad (18)$$

где $y_{mi}(t)$ — эталонные сигналы для локальных подсистем, $\delta > 0$, T — время, по истечении которого с начала работы системы должны выполняться неравенства (18). Кроме того, будем считать, что производные входных и выходных сигналов не измеряются, и в алгоритмах управления локальных подсистем не должны использоваться переменные быстрых составляющих $\sigma_i(t)$, $z_i(t)$ и переменные других подсистем. Будем решать сформулированную задачу при следующих предположениях.

- Элементы матриц $A_j, B_j, D_j, L_j, F_j, C_{ij}, b_j, q_j$, $i = 1, \dots, \pi, j = 1, \dots, \pi$ принадлежат известному ограниченному множеству возможных значений Ξ .
- Пары $(A_i B_i)$ и $(F_i b_i)$ — управляемы, $(A_i L_i)$ и $(F_i q_i)$ — наблюдаемы.
- Передаточные функции $L_i(\lambda I - A_i)^{-1} B_i = k_i R_i(\lambda) / Q_i(\lambda)$, $q_i(\lambda I - F_i)^{-1} b_i = \alpha_i(\lambda) / \beta_i(\lambda)$ минимально фазовые, полиномы $\beta_i(\lambda)$ — гурвицевы, многочлены $R_i(\lambda)$, $Q_i(\lambda)$ и $\beta_i(\lambda)$ нормированы, $k_i > 0$.
- Матрицы F_i не вырождены.
- Известны порядки многочленов $\deg Q_i(\lambda) = n_{1i}$, $\deg R_i(\lambda) = m_{1i}$, $\gamma_i = n_{1i} - m_{1i}$, $\deg \beta_i(\lambda) = n_{2i}$, $\deg \alpha_i(\lambda) = m_{2i}$.
- Внешние воздействия $f_i(t)$ и эталонные сигналы $y_{mi}(t)$ — гладкие ограниченные функции. Возмущения $f_i(t)$ не доступны измерению.

Составляем редуцированную модель объекта управления, для чего полагаем, что $\theta_i = 0$ в уравнении (17):

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= A_i x_i(t) + B_i \sigma_i(t) + D_i f_i(t), \quad y_i(t) = L_i x_i(t), \\ F_i \bar{z}_i(t) + \sum_{j=1, i \neq j}^{\pi} C_{ij} y_j(t) + b_i u_i(t) &= 0, \\ \sigma_i(t) &= q_i \bar{z}_i(t), \quad i = 1, \dots, \pi. \end{aligned} \quad (19)$$

Определяем $\bar{z}_i(t)$ и $\sigma_i(t)$ из второго из уравнений (19):

$$\begin{aligned} \bar{z}_i(t) &= - \sum_{j=1, i \neq j}^{\pi} F_i^{-1} C_{ij} y_j(t) - F_i^{-1} b_i u_i(t), \\ \sigma_i(t) &= - \sum_{j=1, i \neq j}^{\pi} q_i F_i^{-1} C_{ij} y_j(t) - q_i F_i^{-1} b_i u_i(t) \end{aligned}$$

и подставляем их значения в первое из уравнений (19), в результате

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= A_i x_i(t) + B_i \sum_{j=1, i \neq j}^{\pi} \bar{C}_{ij} y_j(t) + B_i \chi_i u_i(t) + D_i f_i(t), \\ y_i(t) &= L_i x_i(t), \end{aligned} \quad (20)$$

где $\chi_i = -q_i F_i^{-1} b_i$, $\bar{C}_{ij} = -q_i F_i^{-1} C_{ij}$.

Преобразуем выражение (20) в равносильную относительно переменных $y_i(t)$ систему уравнений

$$\begin{aligned} Q_i(P) y_i(t) &= k_{0i} R_i(P) u_i(t) + \sum_{j=1, i \neq j}^{\pi} \tau_{ij} R_i(P) y_j(t) + \\ &+ K_i(P) f_i(t), \quad i = 1, \dots, \pi, \end{aligned} \quad (21)$$

где $k_{0i} = k_i \chi_i$, $\tau_{ij} = k_i \bar{C}_{ij}$, $K_i(P) = L_i (PI - A_i)^+ D_i$, $(PI - A_i)^+$ — транспонированная матрица алгебраических дополнений матрицы $PI - A$, $R_i(P) = L_i (PI - A_i)^+ B_i$, $Q_i(P) = \det(PI - A_i)$. Таким образом, имеем π редуцированных моделей, если рассматривать перекрестные связи как возмущения. Поэтому дальнейшие преобразования аналогичны тем, которые выполнены в § 2. Из системы уравнений (21) имеем

$$\begin{aligned} Q_{mi}(P) y_i(t) &= k_{0i} \left(u_i(t) + \frac{N_{1i}(P)}{M_i(P)} u_i(t) + \frac{N_{2i}(P)}{M_i(P)} y_i(t) + \right. \\ &+ \left. \sum_{j=1, i \neq j}^{\pi} \tau_{ij} \frac{R_i(P) S_i(P)}{M_i(P)} y_j(t) + \frac{S_i(P) K_i(P)}{M_i(P)} f_i(t) \right) + v_i(t). \end{aligned}$$

Здесь $Q_{mi}(\lambda)$, $M_i(\lambda)$ и $S_i(\lambda)$ — гурвицевы многочлены степени γ_i , $n_{1i} - 1$ и $\gamma_i - 1$ соответственно, $\deg N_{1i}(P) = n_{1i} - 2$, $\deg N_{2i}(P) = n_{1i} - 1$. Далее со-

ставляем уравнения для ошибок $e_i(t) = y_i(t) - y_{mi}(t)$, формируя $u_i(t)$ в виде $u_i(t) = \alpha_{0i} \vartheta_i(t)$:

$$Q_{mi}(P) e_i(t) = k_{0i} \alpha_{0i} \vartheta_i(t) + \varphi_i(t), \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \varphi_i(t) &= \frac{k_{0i} N_{1i}(P)}{M_i(P)} u_i(t) + \frac{k_{0i} N_{2i}(P)}{M_i(P)} y_i(t) + \\ &+ \frac{k_{0i} S_i(P) K_i(P)}{M_i(P)} f_i(t) + \sum_{j=1, i \neq j}^{\pi} k_{0i} \tau_{ij} \frac{R_i(P) S_i(P)}{M_i(P)} y_j(t) - \\ &- Q_{mi}(P) y_{mi}(t) + v_i(t). \end{aligned}$$

Для каждой локальной подсистемы берем систему управления, состоящую из вспомогательного контура

$$Q_{mi}(P) \bar{e}_i(t) = \beta_{0i} \vartheta_i(t), \quad (23)$$

и наблюдателя производных

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_i(t) &= \Gamma_{0i} \xi_i(t) + d_{0i} (\varsigma_i(t) - \bar{\varsigma}_i(t)), \quad \bar{\varsigma}_i(t) = L_i \xi_i(t), \\ \vartheta_i(t) &= \frac{1}{\beta_{0i}} g_{mi}^T \xi_i(t), \quad i = 1, \dots, \pi. \end{aligned} \quad (24)$$

Здесь $\varsigma_i(t) \in R^{\gamma_i+1}$, $\Gamma_{0i} = \begin{bmatrix} 0 & I_{\gamma_i} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $d_{0i} = \begin{bmatrix} d_{i1} \\ \mu_i \end{bmatrix}$, $d_{i1} = \begin{bmatrix} d_{i1} \\ \mu_i \end{bmatrix}$, $\mu_i > 0$ — достаточно малые величины.

числа $d_{i1}, \dots, d_{i\gamma_i+1}$ выбираются так, чтобы матрицы $\Gamma_i = \Gamma_{0i} + \bar{d}_i L_i$ были гурвицевы, $\bar{d}_i = [d_{i1}, \dots, d_{i\gamma_i+1}]$, $\mu_i > 0$ — достаточно малые величины.

Для каждой из подсистем (22)–(24) справедливо утверждение 1, а для не редуцированной модели объекта управления (17) справедливо следующее

Утверждение 3. Пусть выполнены условия предположений и существует числа θ_{0i} , такие, что решением матричных уравнений

$$H_i F_i + F_i^T H_i + 2\theta_{0i} H_i G_i H_i = -\frac{\theta_{0i}}{\mu_i} I$$

являются положительно определенные матрицы H_i ,

где $G_i = F_i^{-1} b_i \frac{\alpha_{0i}}{\beta_{0i}} g_{mi}^T \left(F_i^{-1} b_i \frac{\alpha_{0i}}{\beta_{0i}} g_{mi}^T \right)^T$. Тогда при $\theta_i < \theta_{0i}$

система управления, состоящая из устройств, реализующих формулы (23) и (24), обеспечивает выполнение целевых условий (18) для модели объекта управления (17). ♦

Доказательство полностью аналогично доказательству утверждения 2, поэтому здесь не приводится.

Замечание. Утверждение 3 справедливо, если во втором из уравнений (17) в перекрестных связях вместо $y_j(t)$ будут присутствовать векторы $x_j(t)$, а также в случае, когда в первом уравнении будут



присутствовать дополнительные составляющие с запаздыванием $x_i(t - h_i)$, $x_j(t - h_j)$, где h_i , h_j — времена запаздывания.

4. ПРИМЕРЫ

Пример 1. Рассмотрим объект управления, динамические процессы в котором описываются уравнениями

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = x_3 + f, \\ \dot{x}_3 = a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + \sigma + f, \\ y = l_1 x_1 + l_2 x_2, \end{cases} \quad \begin{cases} \theta \dot{z}_1 = -6z_1 + z_2, \\ \theta \dot{z}_2 = -12z_1 + z_3 + u, \\ \theta \dot{z}_3 = -8z_1 + 2u, \\ \sigma = z_1. \end{cases} \quad (25)$$

Класс неопределенности Ξ задан неравенствами: $-4 \leq a_i \leq 4$, $i = 1, 2, 3$, $1 \leq l_j \leq 4$, $j = 1, 2$, $|f| \leq 1$. Составляем редуцированную модель объекта

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}}_1 = \bar{x}_2, \\ \dot{\bar{x}}_2 = \bar{x}_3 + f, \\ \dot{\bar{x}}_3 = a_1 \bar{x}_1 + a_2 \bar{x}_2 + a_3 \bar{x}_3 + \sigma + f, \\ y = l_1 \bar{x}_1 + l_2 \bar{x}_2, \end{cases} \quad \begin{cases} -6\bar{z}_1 + \bar{z}_2 = 0, \\ -12\bar{z}_1 + \bar{z}_3 + u = 0, \\ -8\bar{z}_1 + 2u = 0, \\ \sigma = \bar{z}_1. \end{cases}$$

Определим из второй системы уравнений вектор $\bar{z}^T = [\bar{z}_1, \bar{z}_2, \bar{z}_3]$ и переменную σ : $\bar{z}^T = [0, 25; 1, 5; 2]u$, $\sigma = 0,25u$. Подставив значение σ в первую систему уравнений, получим

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = x_3 + f, \\ \dot{x}_3 = a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + 0,25u + f, \\ y = l_1 x_1 + l_2 x_2, \quad e = y - y_m. \end{cases} \quad (26)$$

Возьмем число $\beta_0 = 10$, $u = \alpha_0 \vartheta$ и, принимая во внимание, что $n_1 = 3$, $m_1 = 1$, $\gamma = 2$, возьмем вспомогательный контур (7), который описывается уравнением

$$\bar{e}'' + 3\bar{e}' + 2\bar{e} = 10\vartheta, \quad \varsigma = e - \bar{e}. \quad (27)$$

Уравнения наблюдателя производных сигнала ς (10) имеют вид

$$\begin{aligned} \dot{\xi}_1 &= \xi_2 + \frac{9}{\mu}(\varsigma - \xi_1), \quad \dot{\xi}_2 = \frac{16}{\mu^2} + (\varsigma - \xi_1), \\ \mu &= 0,01. \end{aligned} \quad (28)$$

Тогда управляющее воздействие ϑ (9) формируется в соответствии с формулой

$$\vartheta = -0,1(2\xi_1 + 3\xi_2 + \xi_2), \quad u = \alpha_0 \vartheta. \quad (29)$$

Система управления (27)–(29) обеспечивает выполнение целевого условия (2) для редуцированной модели (26), если $\alpha_0 \geq 2$. С увеличением α_0 значение числа δ в условии (2) уменьшается. Определим величину θ_0 из условия (16), когда $\alpha_0 = 2$. Решая уравнение (16), получаем, что $\theta_0 \in (0,0476; 0,05]$. Как уже говорилось, это грубая оценка величины θ_0 . Фактическое значение θ_0 , полученное экспериментальным путем, равно 0,0695. В этом случае

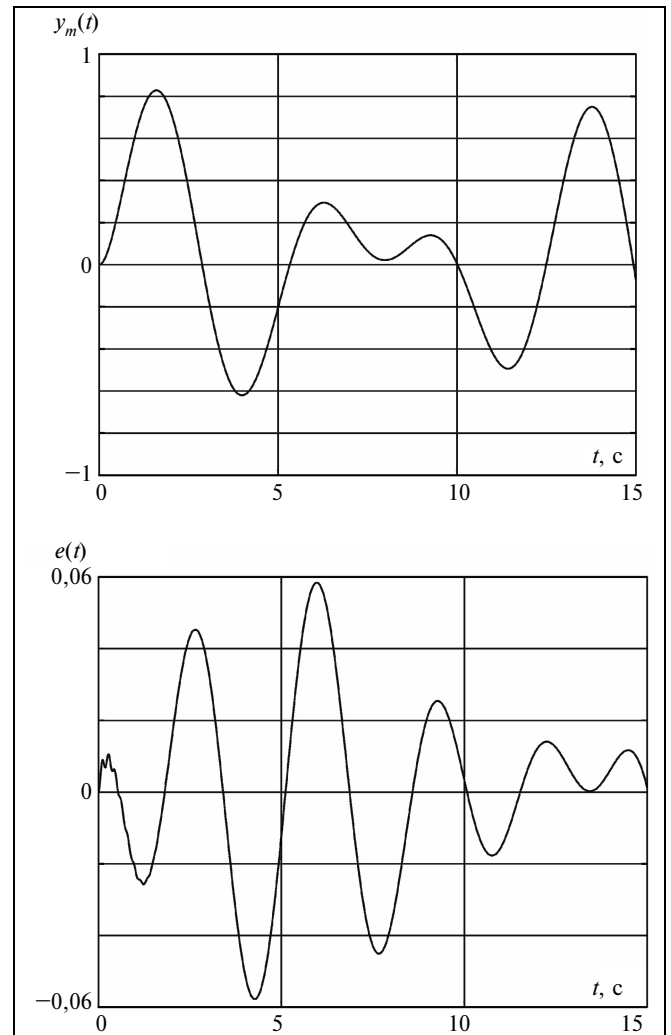


Рис. 1. Графики изменения эталонного сигнала и ошибки

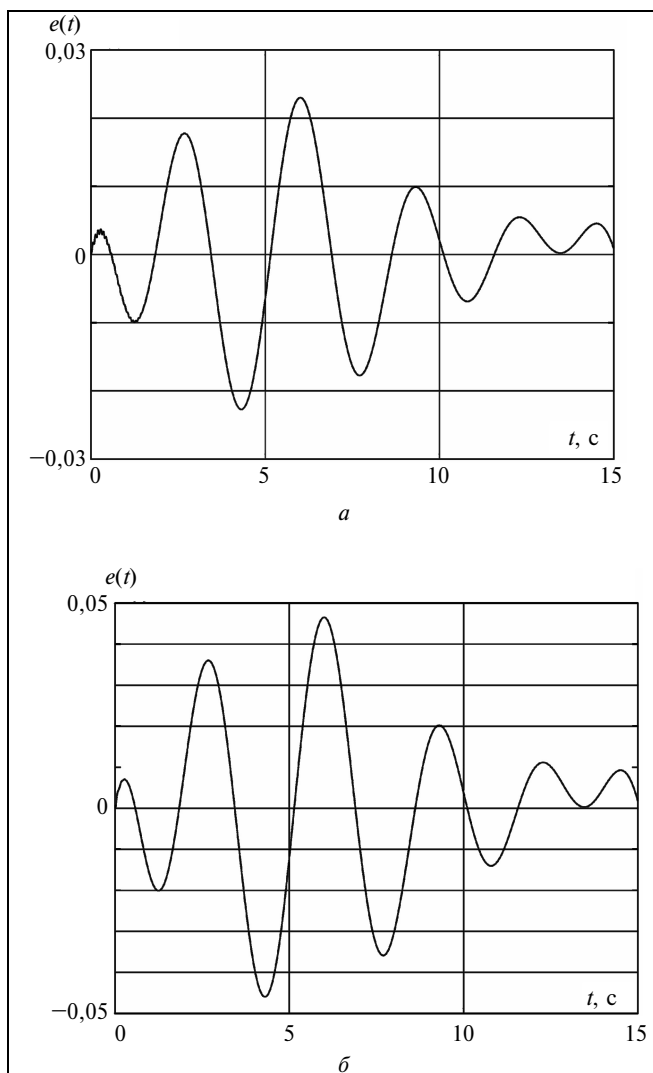


Рис. 2. Переходные процессы по ошибке:
 а — $\alpha_0 = 10$, $\theta_0 = 0,021$, $\theta = 0,02$; б — $\alpha_0 = 5$, $\theta_0 = 0,039$, $\theta = 0,02$

при $\theta < 0,0695$, $\alpha_0 = 2$ система управления обеспечивает выполнение целевого условия для любых значений параметров из заданного класса неопределенности.

Проверим работоспособность системы управления (27)–(29) для модели объекта управления (25) при следующих значениях параметров: $a_1 = a_3 = 4$, $a_2 = -4$, $l_1 = 3$, $l_2 = 2$. Модель медленных составляющих при этих значениях коэффициентов неустойчива, и полюса передаточной функции имеют значения $3,1304$ и $0,4348j$. Возмущающее воздействие формируется в соответствии с формулой $f = 0,5\sin 2t + 0,5\sin 1,3t$. Начальные условия нулевые, $\alpha_0 = 4$, величина $\theta_0 = 0,0695$. На рис. 1 приведены графики эталонного сигнала и ошибки слежения, когда $\theta_0 = 0,0435$, а на рис. 2 — переходные процессы по ошибке.

Пример 2. Рассмотрим двухсвязный объект управления, математическая модель которого после декомпозиции имеет вид:

$$\dot{x}_i(t) = A_i x_i(t) + B_i \sigma_i(t) + D_i f_i(t), \quad y_i(t) = L_i x_i(t),$$

$$\theta_i \dot{z}_i(t) = F_i z_i(t) + \sum_{j=1, i \neq j}^2 C_{ij} x_j(t) + b_i u_i(t),$$

$$\sigma_i(t) = q_i z_i(t), \quad i = 1, 2.$$

Здесь $A_1 = \begin{bmatrix} a_1 & 1 & 0 \\ a_2 & 0 & 1 \\ a_3 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, $A_2 = \begin{bmatrix} a_4 & 1 \\ a_5 & 0 \end{bmatrix}$, $F_1 = \begin{bmatrix} -6 & 1 & 0 \\ -12 & 0 & 1 \\ -8 & 0 & 0 \end{bmatrix}$,

$$F_2 = \begin{bmatrix} -3 & 1 & 0 \\ -3 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ b_3 \end{bmatrix}, D_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, D_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$C_{12} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \\ c_{31} & c_{32} \end{bmatrix}, C_{21} = \begin{bmatrix} c_{23} & 0 & 0 \\ c_{33} & 0 & 0 \end{bmatrix}, b_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 2 \end{bmatrix}, b_2^T = [1 \ 2],$$

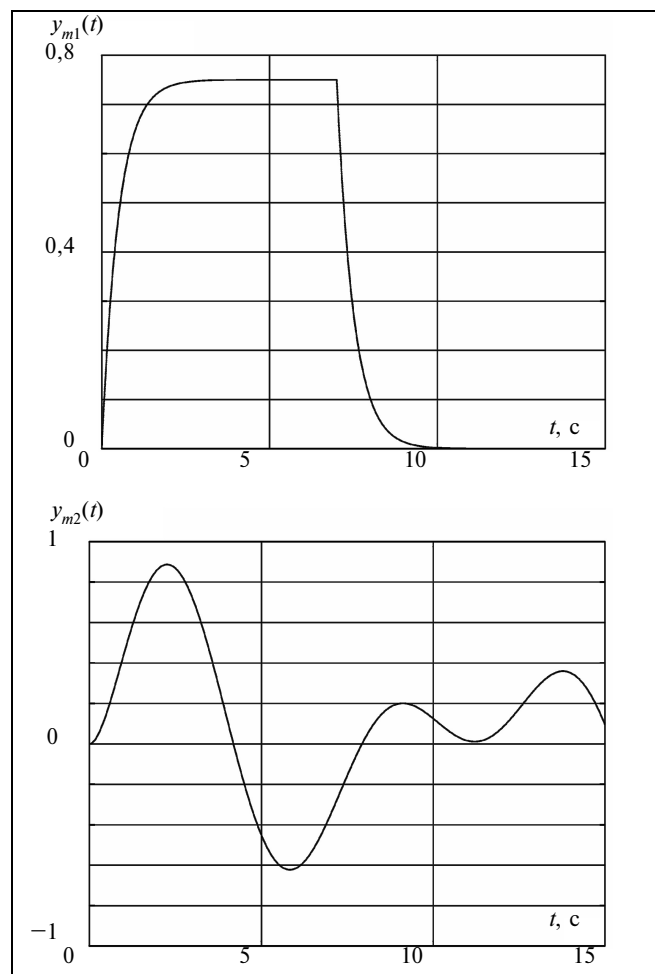


Рис. 3. Графики изменения эталонных сигналов

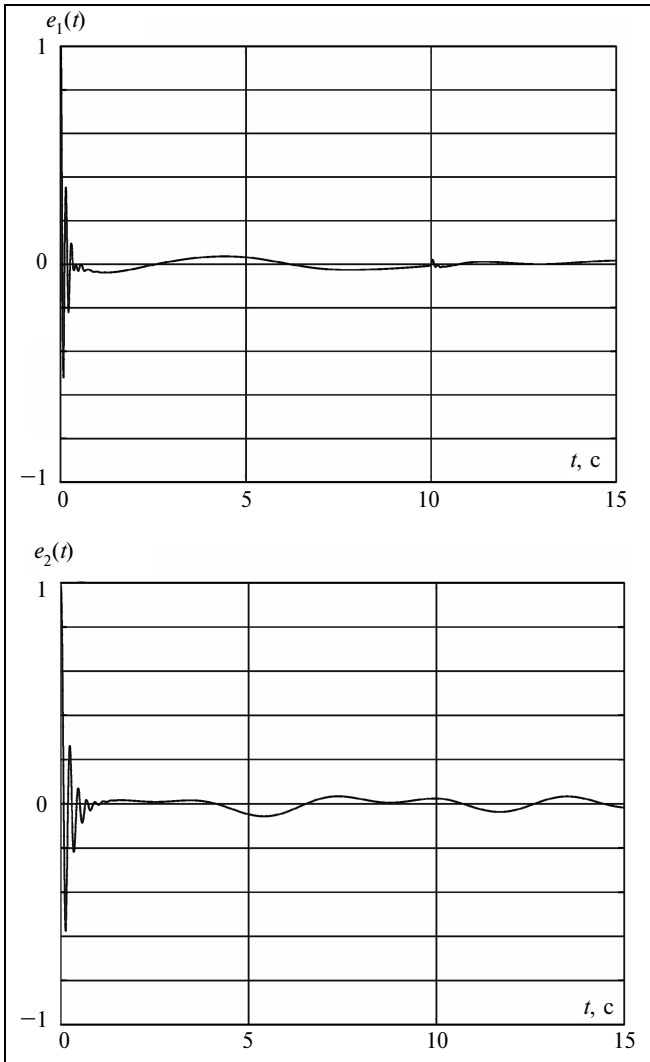


Рис. 4. Переходные процессы в децентрализованной системе по ошибкам

$L_1 = [1 \ 0 \ 0]$, $L_2 = [1 \ 0]$, $\theta_1 = 0,025$, $\theta_2 = 0,02$. Класс неопределенности задан неравенствами: $-4 \leq a_i \leq 4$, $i = 1, \dots, 5$, $1 \leq b_1 \leq 4$, $1 \leq b_2$, $1 \leq b_3 \leq 3$, $-10 \leq c_{ij} \leq 10$, $i = 1, 2$, $j = 1, 2, 3$, $-5 \leq c_{23} \leq 5$, $-5 \leq c_{33} \leq 5$, $|f_1(t)| \leq 1$, $|f_2(t)| \leq 1$.

Следующая система управления обеспечивает выполнение целевых условий (18) со значением $\delta = 0,04$:

$$\begin{aligned} \bar{e}_1'' + 3\bar{e}_1' + 2\bar{e}_1 &= 10\vartheta_1, \quad \varsigma_1 = e_1 - \bar{e}_1, \\ e_1 &= y_1 - y_{m1}, \quad u_1 = 4\vartheta_1, \\ \vartheta_1 &= -0,1(2\xi_{11} + 3\xi_{12} + \xi_{12}), \\ \dot{\xi}_{11} &= \xi_{12} + \frac{9}{\mu}(\varsigma_1 - \varsigma_{11}), \quad \dot{\xi}_{12} = \frac{16}{\mu^2} + (\varsigma_1 - \xi_{11}), \\ \mu &= 0,01, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{e}_2'' + 3\bar{e}_2' + 2\bar{e}_2 &= 10\vartheta_2, \quad \varsigma_2 = e_2 - \bar{e}_2, \\ e_2 &= y_2 - y_{m2}, \quad u_2 = 0,5\vartheta_2, \\ \vartheta_2 &= -0,1(2\xi_{21} + 3\xi_{22} + \xi_{22}), \\ \dot{\xi}_{21} &= \xi_{22} + \frac{9}{\mu}(\varsigma_2 - \varsigma_{21}), \quad \dot{\xi}_{22} = \frac{16}{\mu^2} + (\varsigma_2 - \xi_{21}), \\ \mu &= 0,01. \end{aligned}$$

На рис. 3 и 4 представлены результаты моделирования системы при следующих исходных данных: $a_1 = a_3 = a_4 = 4$, $a_2 = a_5 = -4$, $b_1 = 3$, $b_2 = b_3 = 2$, $c_{ij} = 10$, $i = 1, 2$, $j = 1, 2, 3$, $c_{23} = c_{33} = 3$, $f_1(t) = \sin t$, $f_2(t) = \sin 1,3t$, $x_1^T(0) = [1 \ 1 \ 1]$, $x_2^T(0) = [1 \ 1]$, остальные начальные условия нулевые.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решена задача робастного управления линейным динамическим объектом, математическая модель которого после декомпозиции описывается сингулярно возмущенной системой дифференциальных уравнений. Получены ограничения на малый параметр в уравнениях для быстрых составляющих, при которых система остается сингулярно возмущенной для всего класса неопределенности коэффициентов дифференциальных уравнений. Отметим, что оценка довольно грубая. Показано, что предлагаемый алгоритм управления позволяет частично компенсировать внешние и параметрические возмущения. Полученные результаты обобщены для многосвязных объектов и получена децентрализованная система управления.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Доказательство утверждения 2. Запишем уравнения (14) и (15) в виде

$$\dot{\varepsilon}(t) = A_m \varepsilon(t) + b_1 T_1 \eta(t), \quad e(t) = L_1 \varepsilon(t),$$

$$\theta_1 \Delta \dot{z}(t) = F \Delta z(t) + \theta_2 F^{-1} b \frac{\alpha_0}{\beta_0} g_m^T (\Gamma_0 \xi(t) + d_0 \mu^\gamma L_1 \eta(t)), \quad (\text{П.1})$$

$$\dot{\eta}(t) = \frac{1}{\mu} \Gamma \eta(t) - b_1 \varsigma^{\gamma+1}(t),$$

где $\theta = \theta_1 = \theta_2$. Воспользуемся следующим утверждением.

Лемма [6]. Если динамическая система описывается уравнением

$$\dot{x}(t) = f(x, \mu_1, \mu_2), \quad x(t) \in R^n, \quad \mu_1 > 0, \mu_2 > 0, \quad (\text{П.2})$$

где $f(x, \mu_1, \mu_2)$ — непрерывная функция, липшицева по x , и при $\mu_2 = 0$ система (П.2) имеет ограниченную замкнутую область диссипативности

$$D_x = \{x: F(x) \leq K\}, \quad (\text{П.3})$$

где $F(x)$ — непрерывная, кусочно-гладкая, положительно определенная в R^n функция, такая, что при некоторых $\varepsilon > 0$ и $\mu_0 > 0$ выполнено неравенство

$$\sup_{\mu_i \leq \mu_0} \left[\left(\frac{\partial F}{\partial x} \right)^T f(x, \mu_1, 0) \right] \leq -\varepsilon \text{ при } F(x) = C,$$

тогда для всех достаточно малых $\mu_1, \mu_2 \leq \mu_0$ множество (П.3) остается областью диссипативности системы (П.1). ♦

В качестве функции $F(x)$ можно взять функцию Ляпунова

$$V = \varepsilon^T(t) W \varepsilon(t) + \Delta z^T(t) H \Delta z(t) + \eta^T(t) \Lambda \eta(t). \quad (\text{П.4})$$

В случае, когда число $\theta_2 = 0$, второе из уравнений (П.1) асимптотически устойчиво в силу гурвицевости матрицы F . В этом случае составляющая $\frac{S(P)R(P)}{M(P)} q \Delta z(t)$

ограничена. Тогда, в соответствии с утверждением 1, система диссипативна, и все переменные в ней ограничены. Следовательно, векторы $\varepsilon(t)$, $\Delta z(t)$, $\eta(t)$ и их производные ограничены. Тогда ограничены векторы $\xi(t)$, $\xi_0(t)$ и $z(t)$ вместе со своими производными и существуют числа $\delta_1 > 0$, $\delta_2 > 0$ такие, что $|\xi(t)| < \delta_1$, $|\zeta^{\gamma+1}(t)| < \delta_2$. Сигнал $\zeta^{\gamma+1}(t)$ является последней компонентой вектора $\xi_0(t)$. Условия леммы выполнены. Однако требуется определить то значение числа θ_0 , при котором исходная система будет диссипативной.

Пусть $\theta_1 = \theta_2 = \theta_0$ в уравнениях (П.1) такое, что выполнено условие (16). Матрицы W , H и Λ в функции Ляпунова (П.4) определяются из уравнений:

$$\begin{aligned} WA_m + A_m^T W &= -\frac{1}{\mu} I, \\ HF + F^T H + 2\theta_0 HGH &= -\frac{\theta_0}{\mu} I, \\ G &= F^{-1} b \frac{\alpha_0}{\beta_0} g_m^T \left(F^{-1} b \frac{\alpha_0}{\beta_0} g_m^T \right)^T, \\ \Lambda \Gamma + \Gamma^T \Lambda &= -2I - T^T b_1^T W^T W b_1 T. \end{aligned} \quad (\text{П.5})$$

Вычислим полную производную функции (П.4), принимая во внимание уравнения (П.5):

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\frac{1}{\mu} |\varepsilon(t)|^2 + 2\varepsilon^T(t) W b_1 T \eta(t) - \frac{1}{\mu} |\Delta z(t)|^2 + \\ &+ 2\Delta z^T(t) H F^{-1} b \frac{\alpha_0}{\beta_0} g_m^T (\Gamma_0 \xi(t) + d_0 \mu^\gamma L_1 \eta(t)) - \\ &- \eta^T(t) T^T b_1^T W^T W b_1 T \eta(t) + d_0 \mu^\gamma L_1 \eta(t) - \\ &- \frac{1}{\mu} |\eta(t)| + 2\eta^T(t) \Lambda b_1 \zeta^{\gamma+1}(t). \end{aligned}$$

Воспользуемся оценками:

$$\begin{aligned} 2\varepsilon^T(t) W b_1 T \eta(t) &\leq |\varepsilon(t)|^2 + \frac{1}{\mu} \eta^T(t) T^T b_1^T W^T W b_1 T \eta(t), \\ 2\Delta z^T(t) H F^{-1} b \frac{\alpha_0}{\beta_0} g_m^T (\Gamma_0 \xi(t) + d_0 \mu^\gamma L_1 \eta(t)) &\leq \frac{2}{\mu} \Delta z^T(t) G \Delta z(t) + \\ &+ \mu \delta_3 |\xi(t)|^2 + \mu^{2\gamma+1} \delta_4 |\eta(t)|^2 \leq \frac{2}{\mu} \Delta z^T(t) G \Delta z(t) + \mu \delta_3 \delta_1^2 + \end{aligned}$$

$$+ \mu^{2\gamma+1} \delta_4 |\eta(t)|^2 + 2\eta^T(t) \Lambda b_1 \zeta^{\gamma+1}(t) \leq \frac{1}{\mu} |\eta(t)|^2 + \mu \delta_5 \delta_2^2,$$

$$\delta_3 = |\Gamma_0^T \Gamma_0|, \quad \delta_4 = |d_0|^2, \quad \delta_5 = |b_1^T \Lambda \Lambda b_1|.$$

Подставив эти оценки в формулу производной от функции Ляпунова, получим

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\left(\frac{1-\mu}{\mu} \right) |\varepsilon(t)|^2 - \frac{1}{\mu} |\Delta z(t)|^2 - \left(\frac{1-\mu^{2\gamma+2} \delta_4}{\mu} \right) |\eta(t)|^2 + \\ &+ \mu (\delta_3 \delta_1^2 + \delta_5 \delta_2^2). \end{aligned} \quad (\text{П.6})$$

Величина μ значительно меньше единицы, поэтому выберем число τ из условия $\tau = \min \left\{ \frac{1-\mu^2}{\lambda_{\max}(W)}, \frac{1}{\lambda_{\max}(H)}, \frac{1-\mu^{2\gamma+2} \delta_4}{\lambda_{\max}(\Lambda)} \right\}$, где $\lambda_{\max}(\cdot)$ — максимальное собственное

число соответствующей матрицы. Тогда из формулы (П.6)

$$\dot{V} \leq -\frac{\tau}{\mu} V + \mu (\delta_3 \delta_1^2 + \delta_5 \delta_2^2).$$

Решив данное неравенство, получим $V \leq V(0) e^{-\tau t/\mu} + (1 - e^{-\tau t/\mu}) \frac{\mu^2 (\delta_3 \delta_1^2 + \delta_5 \delta_2^2)}{\tau}$, откуда для фиксированного значения $t = T$ следует оценка величины δ в целом условии (2) при выбранном значении μ , которое получено при проектировании алгоритма управления по редуцированной модели:

$$\begin{aligned} \delta^2 &\leq \frac{1}{\lambda_1 \min(W)} V \leq \frac{1}{\lambda_1 \min(W)} (V(0) e^{-\tau T/\mu} + \\ &+ (1 - e^{-\tau T/\mu}) \mu^2 (\delta_3 \delta_1^2 + \delta_5 \delta_2^2) / \tau). \end{aligned}$$

Это достаточно грубая оценка, но из нее видно, что уменьшая величину μ , можно получить требуемую точность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фрадков А.Л. Адаптивное управление в сложных системах. — М.: Наука, 1990.
2. Дмитриев М.Г., Курина Г.А. Сингулярные возмущения в задачах управления // Автоматика и телемеханика. — 2006. — № 1. — С. 3—51.
3. Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. — СПб.: Наука, 2000.
4. Цыкунов А.М. Алгоритмы робастного управления с компенсацией ограниченных возмущений // Автоматика и телемеханика. — 2007. — № 7. — С. 103—105.
5. Atassi A.N., Khalil H.K. Separation principle for the stabilization of class of nonlinear systems // IEEE Trans. on Automat. Control. — 1999. — Vol. 44, N 9. — P. 1672—1687.
6. Бруси́н В.А. Об одном классе сингулярно-возмущенных адаптивных систем // Автоматика и телемеханика. — 1995. — № 4. — С. 119—127.

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Ю. Рутковским.

Цыкунов Александр Михайлович — д-р техн. наук, зав. кафедрой, Астраханский государственный технический университет, ☎ (8512) 61-42-48, ✉ tsygunov_al@mail.ru.



МЕТОД ОТКАЗОУСТОЙЧИВОГО УПРАВЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ: ЛОГИКО-ДИНАМИЧЕСКИЙ ПОДХОД¹

А.Е. Шумский, А.Н. Жирабок, Е.Ю. Бобко

На основе логико-динамического подхода предложен метод решения задачи управления нелинейными динамическими системами с дефектами.

Ключевые слова: нелинейная динамическая система, дефект, отказоустойчивое управление, логико-динамический подход.

ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

К надежности и безопасности технических систем ответственного назначения предъявляются жесткие требования, что приводит к необходимости разработки комплекса мер по обеспечению их отказоустойчивости. Существующие подходы к обеспечению отказоустойчивости предполагают резервирование либо формирование специального управления, которое позволяет сохранять важнейшие характеристики системы при наличии в ней дефектов (возможно, при ухудшении второстепенных характеристик). Последний подход принято называть аккомодацией к дефектам [1].

Различают пассивный и активный подходы к решению задачи аккомодации [1]. Пассивный подход предполагает, что закон управления изначально разработан так, что обеспечивает адаптацию к параметрическим возмущениям, вызываемым дефектами. Возможности пассивного подхода ограничиваются так называемыми «малыми» дефектами. В основе активного подхода лежит формирование нового управления, позволяющего в той или иной степени устранить влияние дефектов на систему. Активный подход предоставляет больше возможностей, однако его реализация требует, как минимум, предварительного обнаружения дефектов. Более того, многие существующие методы, разработанные в рамках активного подхода, предполагают предварительное оценивание размера дефекта (что требует дополнительных временных и вычис-

лительных затрат), после чего задача аккомодации может быть решена на основе методов оптимального управления [2], H_∞ -оптимизации [3], слежения за эталонной моделью [4] и адаптивного управления [5].

Далее решение задачи аккомодации связывается с формированием управления, при котором обеспечивается полная развязка от воздействий, вызываемых дефектами. Такой метод предпочтителен в тех случаях, когда оценивание размера дефектов по тем или иным причинам не представляется возможным или нецелесообразно; его применение позволяет сократить временные затраты на формирование нового управления и, как следствие, повысить эффективность аккомодации.

Подобный метод был также рассмотрен в работе [6], где решение проблемы аккомодации для нелинейных систем с гладкими функциями было получено на основе алгебры функций и дифференциальной геометрии. В настоящей работе для решения этой проблемы применен логико-динамический подход [7–9]. Его особенность состоит в том, что он позволяет работать с недифференцируемыми нелинейностями. Подход не гарантирует получения оптимального решения задачи в смысле размерности получаемых систем, но он оперирует методами линейной алгебры, что существенно упрощает решение задачи. Кроме того, подход применим к системам с линейной функцией выхода и динамикой, приводимой к виду, описываемому следующими уравнениями:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Fx(t) + Gu(t) + C\varphi(Ax(t), u(t)) + L\vartheta(t), \\ y(t) &= Hx(t).\end{aligned}\quad (1)$$

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ.

Здесь $x(t) \in R^n$, $u(t) \in R^m$, $y(t) \in R^l$ — векторы состояния, управления и выхода; F , G , H и L — известные матрицы соответствующих размеров;

$$\varphi(Ax(t), u(t)) = \begin{pmatrix} \varphi_1(A_1x(t), u(t)) \\ \dots \\ \varphi_r(A_rx(t), u(t)) \end{pmatrix} \text{ — векторная функ-}$$

кция, φ_i — нелинейная (возможно, недифференцируемая) функция; A_i — матрица-строка, $1 \leq i \leq r$; C — матрица размера $n \times r$: если в правую часть уравнения для i -й компоненты вектора состояния исходной системы входит нелинейность $\varphi_i(A_ix(t), u(t))$, то $C(i, j) \neq 0$, в противном случае $C(i, j) = 0$; $\vartheta(t) \in R^v$ — вектор, описывающий дефекты: при отсутствии дефектов $\vartheta(t) = 0$, при их возникновении $\vartheta(t)$ становится неизвестной функцией времени. Будем также обозначать систему (1) без нелинейности $\varphi(Ax(t), u(t))$ тройкой $\Sigma = (F, G, H)$.

Предполагается, что задача обнаружения дефектов решается известными методами, например, описанными в работах [1, 8, 9]. Поскольку функция времени $\vartheta(t)$ неизвестна, решение задачи управления на основе модели (1) при наличии в системе дефектов невозможно. Для преодоления этой трудности предлагается формировать вектор управления $u(t)$ в виде

$$u(t) = g(y(t), x_0(t), u_*(t)) \quad (2)$$

для некоторой функции g , где $u_*(t) \in R^m$ — новый вектор управления, $x_0(t) \in R^s$, $s \leq n$, — вектор состояния вспомогательной системы Σ_0 , подлежащей определению и описываемой уравнением

$$\dot{x}_0(t) = F_0x_0(t) + G_0u(t) + J_0y(t) + C_0\varphi(A_0x_0(t), y(t), u(t)). \quad (3)$$

Модель (3) не зависит от неизвестного вектора $\vartheta(t)$ и может быть использована для построения наблюдателя, оценивающего некоторую линейную функцию от вектора состояния исходной системы при наличии в ней дефектов; эта функция определяется далее.

По аналогии с работой [6] предполагается, что модель, полученная подстановкой уравнения (2) в первое из уравнений (1), может быть преобразована к системе Σ_* , описываемой в общем случае уравнением

$$\dot{x}_*(t) = F_*x_*(t) + G_*u_*(t) + C_*\varphi(A_*x_*(t), u(t)) \quad (4)$$

с вектором состояния $x_*(t) \in R^p$, $p \leq s$. Если дефект возник и обнаружен, а управление (2) существует,

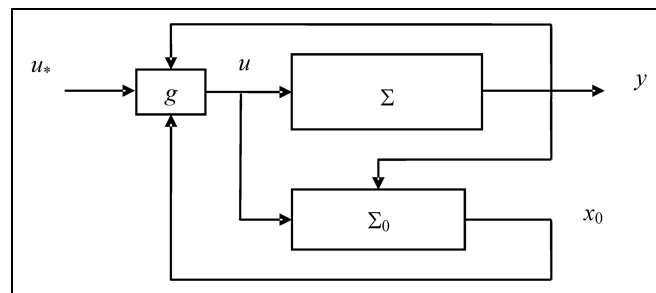


Рис. 1. Схема управления системой

то проблема управления исходной системой решается на основе модели (4), которая не содержит неизвестный вектор $\vartheta(t)$, для чего находится требуемое управление $u_*(t)$ и затем по формуле (2) определяется управление $u(t)$, подаваемое на систему с дефектом. В результате описанных действий возникает эффект аккомодации к дефектам. Описанная схема управления представлена на рис. 1.

Отметим, что использование управления (2) предполагает движение системы (1) только в некотором подпространстве ее пространства состояний, которое соответствует пространству состояний системы (4). Отсюда следует, что цель управления достигается соответствующим выбором траектории в этом подпространстве. Необходимость существования соответствующей траектории (или необходимости корректировки цели управления для нахождения такой траектории) ограничивает область приложения рассматриваемого подхода.

Задача, решаемая в настоящей работе, состоит в определении условий существования закона управления (2) и всех матриц, описывающих системы (3) и (4), на основе логико-динамического подхода, описанного в работах [7–9]. Для удобства дальнейшего изложения приведем его краткое описание.

1. ЛОГИКО-ДИНАМИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Логико-динамический подход предполагает выполнение следующих трех шагов [7–9].

1. Замена нелинейной системы (1) так называемой логико-динамической (ЛД) системой, содержащей несколько линейных подсистем и логических условий определенного вида.

2. Решение задачи для ЛД системы и получение ЛД формы системы (3).

3. Преобразование ЛД формы в нелинейную систему.

Для иллюстрации подхода рассмотрим простой случай с единственной нелинейностью вида $C\varphi(Ax(t), u(t)) = G'u(t)\text{sign}(Ax(t))$ для некоторой матрицы G' и матрицы-строки A .



На первом шаге исходная система заменяется ЛД системой, которая состоит из трех линейных подсистем $\Sigma_1 = (F, G - G', H)$, $\Sigma_2 = (F, G, H)$, $\Sigma_3 = (F, G + G', H)$ и трех логических условий $Ax(t) < 0$, $Ax(t) = 0$, $Ax(t) > 0$. Если выполняется условие $Ax(t) < 0$, то (при отсутствии дефектов) модель (1) принимает вид Σ_1 : $\dot{x}(t) = Fx(t) + (G - G')u(t)$, если $Ax(t) = 0$, то вид Σ_2 : $\dot{x}(t) = Fx(t) + Gu(t)$, если $Ax(t) > 0$, то вид Σ_3 : $\dot{x}(t) = Fx(t) + (G + G')u(t)$. Важно, что все три модели содержат одинаковую матрицу F . Будем называть Σ_2 линейной частью системы (1).

На втором шаге строится ЛД форма системы (3). Предполагается, что ее структура аналогична ЛД структуре исходной системы, т. е. существуют три подсистемы Σ_{01} , Σ_{02} , Σ_{03} и матрица-строка A_0 такие, что выполняется следующее: если $A_0z < 0$, то система (3) принимает вид Σ_{01} : $\dot{x}_0(t) = F_0x_0(t) + (G_0 - G'_0)u(t) + J_0y(t)$, если $A_0z = 0$, то вид Σ_{02} : $\dot{x}_0(t) = F_0x_0(t) + G_0u(t) + J_0y(t)$, если $A_0z > 0$, то вид Σ_{03} : $\dot{x}_0(t) = F_0x_0(t) + (G_0 + G'_0)u(t) + J_0y(t)$. Здесь F_0 , G_0 , J_0 и G'_0 — матрицы, подлежащие определению, $z = \begin{pmatrix} x_0 \\ y \end{pmatrix}$.

Для построения линейной части системы (3) предположим, что существует матрица Φ с условием $\Phi x(t) = x_0(t) \forall t$ при отсутствии дефектов. Известно [8], что для этой матрицы выполняются следующие соотношения:

$$\Phi F = F_0 \Phi + J_0 H, \quad G_0 = \Phi G. \quad (5)$$

Известно также [8, 9], что система (3) будет свободна от неизвестного вектора $\vartheta(t)$, когда выполняется равенство $\Phi L = 0$. Для согласования логических условий исходной ЛД системы и ЛД системы (3) предположим, что выполняются следующие условия: если $Ax(t) < 0$, то $A_0z < 0$, если $Ax(t) = 0$, то $A_0z = 0$, если $Ax(t) > 0$, то $A_0z > 0$. Поскольку $x_0(t) = \Phi x(t)$ и $y(t) = Hx(t)$,

т. е. $A_0z = A_0 \begin{pmatrix} x_0 \\ y \end{pmatrix} = A_0 \begin{pmatrix} \Phi \\ H \end{pmatrix} x$, эти условия выполняются,

если $A = A_0 \begin{pmatrix} \Phi \\ H \end{pmatrix}$. Последнее равенство эквивалентно ранговому равенству

$$\text{rank} \begin{pmatrix} \Phi \\ H \end{pmatrix} = \text{rank} \begin{pmatrix} \Phi \\ H \\ A \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Это соотношение представляет собой дополнительное к соотношениям (5) ограничение на матрицу Φ .

2. ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ Σ_0

Матрица Φ может быть получена следующим образом. Введем матрицу L^0 максимального ранга

такую, что $L^0 L = 0$. Условие $\Phi L = 0$ тогда эквивалентно равенству $\Phi = NL^0$ для некоторой матрицы N . Замена матрицы Φ в первом из уравнений (5) на NL^0 дает уравнение $NL^0 F = F_0 NL^0 + J_0 H$, которое может быть преобразовано к виду

$$(N - F_0 N - J_0) \begin{pmatrix} L^0 F \\ L^0 \\ H \end{pmatrix} = 0. \quad \text{Это выражение можно}$$

рассматривать как однородное алгебраическое уравнение для неизвестных матриц N , F_0 и J_0 . Пусть матрица $(A \ B \ C)$ дает все линейно независимые решения этого уравнения, т. е.

$$(A \ B \ C) \begin{pmatrix} L^0 F \\ L^0 \\ H \end{pmatrix} = 0. \quad (7)$$

Для того чтобы матрицы A и B могли быть использованы для построения системы (3), должно выполняться соотношение $B = -F_0 A$ для некоторой матрицы F_0 , поскольку $A = N$ и $B = -F_0 N$. Для получения матриц, удовлетворяющих этому требованию, найдем строки матрицы B , линейно независимые от строк матрицы A , и удалим их из матрицы $(A \ B \ C)$. Обозначим полученную матрицу через $(A^0 \ B^0 \ C^0)$ и положим $N = A^0$, $\Phi = NL^0$. Если при $\Phi G' \neq 0$ матрица Φ удовлетворяет условию (6), то ЛД система (3) может быть построена, в противном случае — нет; при $\Phi G' = 0$ условие (6) можно не проверять. При положительном исходе проверки положим $G_0 = \Phi G$ и $J_0 = -C^0$; матрица F_0 является решением уравнения $F_0 N = -B^0$. В результате получаем линейную часть системы (3), описываемую уравнением $\dot{x}_0(t) = F_0 x_0(t) + G_0 u(t) + J_0 y(t)$.

На третьем шаге полученная ЛД система преобразуется в нелинейную. Для этого согласно работе [8] нелинейный член $G'_0 u(t) \text{sign}(A_0 x(t))$ с $G'_0 = \Phi G'$ и матрицей A_0 , полученной из уравнения $A = A_0 \begin{pmatrix} \Phi \\ H \end{pmatrix}$, добавляется в правую часть уравнения, описывающего линейную часть, что дает окончательное выражение для системы (3):

$$\begin{aligned} \dot{x}_0(t) = & F_0 x_0(t) + G_0 u(t) + J_0 y(t) + \\ & + G'_0 u(t) \text{sign}(A_0 x(t)). \end{aligned}$$

3. ОБОБЩЕНИЯ

Предложенный подход может быть применен для других типов нелинейностей, включая гладкие (дифференцируемые), например, $G'u(t)\sin(Ax)$, $G'u(t)\log(Ax)$ и др. Действительно, рассмотрим члены $G'u(t)\text{sign}(Ax)$ и $G'_0 u(t)\text{sign}(A_0 z(t))$ в системах (1) и (3) соответственно. Ясно, что последний получен в результате определенного преобразования первого, и логико-динамический подход дает правила такого преобразования. Поэтому нелинейность $G'u(t)\sin(Ax)$ в исходной системе даст член $G'_0 u(t)\sin(A_0 z(t))$ в системе (3). В этом случае ограничение (6) отражает уже не логику, а условия согласования нелинейностей в системах (1) и (3). Логический смысл этого ограничения сохраняется для нелинейностей типа люфт, гистерезис, насыщение, а также в случае кусочно-линейной аппроксимации функций, входящих в правую часть модели исходной системы.

Если модель (1) содержит несколько нелинейностей, то матрица A в условии (6) заменяется на матрицу $A' = (A_{j_1}^T \ A_{j_2}^T \ \dots \ A_{j_d}^T)^T$, где $j_1, j_2, \dots, j_d$ — номера ненулевых столбцов матрицы $C_0 = \Phi C$. На третьем шаге нелинейный член добавляется в правую часть линейной части системы (3) в виде

$$C_0 \cdot \begin{pmatrix} \varphi_{j_1}(A_{0j_1} x(t), u(t)) \\ \dots \\ \varphi_{j_d}(A_{0j_d} x(t), u(t)) \end{pmatrix}, \text{ где матрицы-строки } A_{0j_1},$$

$A_{0j_2}, \dots, A_{0j_d}$ определяются из линейных алгебра-

ических уравнений $A_j = A_{0j} \begin{pmatrix} \Phi \\ H \end{pmatrix}, j = j_1, j_2, \dots, j_d$.

Для того чтобы линейная часть системы отражала структуру исходной нелинейной, необходимо соответствующим образом выбирать матрицу F , одновременно преобразуя нелинейный член. В общем случае рекомендуется использовать матрицу динамики исходной системы в виде $F + CA$, а нелинейный член — в виде $C\varphi(Ax(t), u(t)) - CAx(t)$. Во многих случаях к строкам матрицы F достаточно добавить только отдельные члены вида $A_j x(t)$.

Обобщая и несколько упрощая, можно сказать, что логико-динамический подход состоит в решении поставленной задачи для линейной части исходной нелинейной системы и добавлении в полученное линейное решение определенным образом преобразованную нелинейную составляющую исходной системы.

4. ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ Σ_*

Для построения системы (4) предположим, что векторная функция $G_0 u(t) + C_0 \varphi(A_0 z(t), u(t))$, имеющая s компонент, содержит m' , $m' \leq m$, компонент вектора u и функция φ дифференцируема по этим компонентам. Без потери степени общности предположим, что это будут первые m' компонент: $u_1, u_2, \dots, u_{m'}$. Предположим также, что для всех $x_0 \in R^s, y \in R^l$ и $u \in R^m$ справедливо равенство

$$\text{rank} \left(\frac{\partial}{\partial (u_1, u_2, \dots, u_{m'})} (G_0 u(t) + C_0 \varphi(A_0 z(t), u(t))) \right) = c \quad (8)$$

для некоторого c . Далее введем матрицу Ψ такую, что $x_*(t) = \Psi x(t) \forall t$. Дифференцируя обе части этого равенства по времени и учитывая модель (1) при $\vartheta(t) = 0$, получаем $\dot{x}_*(t) = \Psi(Fx(t) + Gu(t) + C\varphi(Ax(t), u(t)))$. Из результатов работы [6] следует, что матрицы Φ и Ψ связаны соотношением $\Psi = M\Phi$ для некоторой матрицы M . Определяя матрицу Ψ , рассмотрим два случая.

1. Если $s = c$, положим $M = I_{c \times c}$, где $I_{c \times c}$ — единичная $c \times c$ матрица, откуда $\Psi = \Phi$. Из равенства $x_*(t) = \Psi x(t) = \Phi x(t) = x_0(t)$ и моделей (3) и (4) следует соотношение

$$\begin{aligned} F_* x_*(t) + G_* u_*(t) + C_* \varphi(A_* x_*(t), u_*(t)) = \\ = F_0 x_0(t) + G_0 u(t) + J_0 y(t) + \\ + C_0 \varphi(A_0 x_0(t), y(t), u_*(t)), \end{aligned} \quad (9)$$

которое является основой для построения закона управления (2). Поскольку в выражение (2) по предположению не входит вектор состояния x_* , примем $F_* = 0$ и $C_* = 0$. Кроме того, для упрощения процесса управления системой Σ_* положим $C_* = I_{c \times c}$. В результате получаем следующую модель системы Σ_* :

$$\dot{x}_{*i}(t) = u_{*i}(t), \quad 1 \leq i \leq c, \quad (10)$$

т. е. для управления системой (4) необходимо определить первые c компонент вектора $u_*(t)$. Остальные компоненты могут быть выбраны произвольно, например, можно принять $u_{*i}(t) = 0, c + 1 \leq i \leq m$. ♦



2. Если $s > c$, найдем матрицу P , содержащую c строк, такую, что

$$\text{rank}\left(\frac{\partial}{\partial(u_1, u_2, \dots, u_m)}(PG_0u(t) + PC_0\varphi(A_0z(t), u(t)))\right) = c \quad (11)$$

для всех $x \in R^n$ и $u \in R^m$. Представим матрицу Ψ в виде $\Psi x = \begin{pmatrix} \Psi^{(1)} \\ \Psi^{(2)} \end{pmatrix} x = \begin{pmatrix} x_*^{(1)} \\ x_*^{(2)} \end{pmatrix} = x_*$, где $\Psi^{(1)} = P\Phi$, $\Psi^{(2)} = Q\Phi$ для некоторой матрицы Q , что соответствует $M = \begin{pmatrix} P \\ Q \end{pmatrix}$. Из сказанного следует, что система Σ_* ищется в виде композиции двух подсистем. Как и ранее, положим $F_* = 0$, $C_* = 0$ и $C_* = I_{c \times c}$, что в результате дает

$$\dot{x}_{*i}^{(1)}(t) = u_{*i}(t), \quad 1 \leq i \leq c.$$

Остальные компоненты вектора $u_*(t)$, как и ранее, могут быть выбраны произвольно. ♦

Предполагается, что вектор $x_*^{(2)} = \Psi^{(2)}x = Q\Phi x$ удовлетворяет уравнению

$$\dot{x}_*^{(2)}(t) = F_*x_*^{(2)}(t) + J_*x_*^{(1)}(t) + C_*\varphi\left(A_*\begin{pmatrix} x_*^{(1)}(t) \\ x_*^{(2)}(t) \end{pmatrix}\right), \quad (12)$$

т. е. он не зависит от вектора управления. Из этого уравнения и уравнения $\dot{x}_*^{(2)} = Q\Phi x$ получаем

$$\begin{aligned} \dot{x}_*^{(2)}(t) &= Q\Phi(Fx(t) + Gu(t) + C\varphi(Ax(t), u(t)) + L\vartheta(t)) = \\ &= Q(F_0x(t) + G_0u(t) + C_0\varphi(Ax(t), u(t))) = \\ &= F_*x_*^{(2)}(t) + J_*x_*^{(1)}(t) + C_*\varphi\left(A_*\begin{pmatrix} x_*^{(1)}(t) \\ x_*^{(2)}(t) \end{pmatrix}\right), \end{aligned}$$

откуда следует, что матрица Q должна удовлетворять условию $Q\left(G_0 + C_0\frac{\partial}{\partial u}\varphi(Ax, u)\right) = 0$. Такая матрица может быть получена следующим образом. Введем матрицу Q^* максимального ранга такую, что

$$Q^*\left(G_0 + C_0\frac{\partial}{\partial u}\varphi(Ax, u)\right) = 0, \quad (13)$$

тогда $Q = N^*Q^*$ для некоторой матрицы N^* . Из модели (12) и соотношений $x_{*i}^{(1)}(t) = P\Phi(t)$ и $x_*^{(2)}(t) = Q\Phi(t)$ следует равенство $Q\Phi F = F_*Q\Phi +$

$+ J_*P\Phi$. Как и в случае системы Σ_0 , оно эквивалентно равенству

$$(N^* - F_*N^* - J_*)\begin{pmatrix} Q^*\Phi F \\ Q^*\Phi \\ P\Phi \end{pmatrix} = 0. \quad (14)$$

По аналогии с матрицей $(A^0 \ B^0 \ C^0)$ получим матрицу $(A^* \ B^* \ C^*)$, что в итоге дает $N^* = A^*$ и $J^* = -C^*$; матрицы F_* и A_* — это решения уравнений $F_*N^* = -B^*$ и $A = A_*\begin{pmatrix} P\Phi \\ Q\Phi \end{pmatrix}$ соответственно; примем $Q = N^*Q^*$, $C^* = QC_0$. Таким образом, получены все матрицы, входящие в модель (12).

5. ПОСТРОЕНИЕ ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ

Конструируя закон управления, рассмотрим четыре случая.

1. Пусть $c = m'$ и $s = c$, то из равенств (9), $F_* = 0$, $C_* = 0$ и $G_* = I_{c \times c}$ следует уравнение

$$F_0x_0(t) + G_0u(t) + J_0y(t) + C_0\varphi(A_0z(t), u(t)) = u_*(t) \quad (15)$$

с вектором u_* размерности c . Поскольку $c = m'$ и $s = c$, оно разрешимо относительно переменных $u_1, u_2, \dots, u_c$ и согласно выражению (2) переменные $u_1, u_2, \dots, u_c$ могут быть определены с помощью некоторых функций $g_1, g_2, \dots, g_c$ следующим образом:

$$u_i(t) = g_i(y(t), x_0(t), u_{*1}(t), \dots, u_{*c}(t)), \quad 1 \leq i \leq c = m'. \quad (16)$$

Положим $u_i(t) = u_{*i}(t)$, $m' + 1 \leq i \leq m$, для остальных $m - m'$ компонент. Отметим, что в некоторых случаях равенство (8) может нарушаться для некоторых значений вектора $u \in R^m$, но уравнение (15) остается разрешимым. В частном случае, когда $m' = m$, $\text{rank}(G_0) = c$ и $G_0^{-1}C_0 = 0$, выражение (16) принимает вид

$$u(t) = G_0^{-1}(u_*(t) - F_0x_0(t) - J_0y(t)). \quad \blacklozenge$$

2. Если $c = m'$ и $c < s$, то равенство (15) с учетом определения матрицы P согласно равенству (11) переходит в уравнение

$$P(F_0x_0(t) + G_0u(t) + J_0y(t) + C_0\varphi(A_0z(t), u(t))) = u_*(t),$$

которое разрешимо относительно переменных $u_1, u_2, \dots, u_m$ в форме (16). ♦

3. Если $c < m'$ и $s = c$, выражение $G_0 u(t) + C_0 \varphi(A_0 z(t), u(t))$ содержит избыточные компоненты вектора u . В этом случае можно получить не отдельные компоненты вектора $u(t)$ (как это дается выражением (16)), а только их комбинации в виде

$$\psi_i(u(t)) = g_i(y(t), x_0(t), u_{*1}, \dots, u_{*c}(t)), \quad 1 \leq i \leq c,$$

для некоторых функций $\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_c$. В частном случае, когда $G_0 = (G_* \ G'_*)$, $\text{rank}(G_0) = \text{rank}(G_*) = c$ и $G_*^{-L} C_0 = 0$, из уравнения (15) следует простое выражение

$$(I_c \times G_*^{-L} G'_*) u(t) = G_*^{-L} (u_*(t) - F_0 x_0(t) - J_0 y(t)),$$

в явном виде задающее отмеченные выше комбинации компонент вектора $u(t)$; здесь G_*^{-L} — левая обратная матрица к матрице G_* . ♦

4. Если $c < m'$ и $c < s$, все сказанное в п. 3 должно применяться к выражению $P(G_0 u(t) + C_0 \varphi(A_0 z(t), u(t)))$ и матрице $P G_0$, где матрица P определяется согласно выражению (11). ♦

6. ПРИЛОЖЕНИЯ К ЗАДАЧЕ УПРАВЛЕНИЯ

Как уже говорилось, эффект аккомодации обеспечивается тем, что при наличии в системе дефектов задача управления решается на основе модели (4). Пусть, например, требуется найти управление, переводящее систему (1) из состояния $x^1 = x(t_1)$ в состояние $x^2 = x(t_2)$. Для решения этой задачи находятся состояния системы (4) $x_*^1 = \Psi x^1$ и $x_*^2 = \Psi x^2$ (для простоты рассмотрим случай $s = c$). Как следует из модели (10), система Σ_* имеет элементарное описание, что позволяет получить для нее исчерпывающее решение задачи терминально-

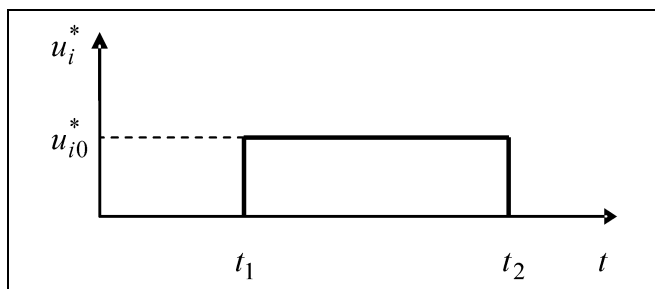


Рис. 2. Вид закона управления

го управления. Поскольку составляющие в модели (10) независимы друг от друга, каждую из них можно рассматривать отдельно. Так как i -я компонента вектора управления совпадает со скоростью изменения соответствующей компоненты вектора состояния x_* , то управление, изменяющее значение его i -й компоненты с $x_{*i}^1 = x_{*i}(t_1)$ на $x_{*i}^2 = x_{*i}(t_2)$ в случае $x_{*i}^1 = x_{*i}^2$, имеет очевидный вид, представленный на рис. 2, где $u_{i0}^* = (x_{*i}^2 - x_{*i}^1)/(t_2 - t_1)$. Аналогичный вид имеют решения для остальных компонент, подстановка которых в уравнение (3) дает управление для исходной системы.

Как следует из изложенного, в общем случае размерность вектора состояния x_* меньше размерности вектора x , в результате чего перевод исходной системы в состояние x^2 может осуществляться только с определенной степенью точности, которая определяется матрицей Ψ . Это означает, что перевод может быть произведен в такое состояние x^{2*} , что $\Psi x^{2*} = \Psi x^2$. При этом можно сказать, что указанная степень точности, а также качество функционирования системы (4) будут определять качество функционирования исходной системы в присутствии дефектов. Отметим, что состояние, фактически достигнутое в результате такого перевода, может быть определено с помощью системы Σ_0 ;

точность такого определения дается матрицей $\begin{pmatrix} \Phi \\ H \end{pmatrix}$.

Очевидно, что описанная процедура построения закона управления может быть применена и тогда, когда дефекты в системе (1) не рассматриваются. В этом случае вместо системы (3) может быть взят классический наблюдатель Люенбергера (или фильтр Калмана при необходимости учета возмущений в динамике и измерениях), формирующий оценку $\hat{x}(t)$ полного вектора состояния исходной системы. Здесь наиболее простой по форме результат получается в случае, когда $m' = m$ для всех $x \in R^n$ и $u \in R^m$, где

$$m' = \text{rank} \left(\frac{\partial}{\partial (u_1, u_2, \dots, u_m)} (Gu(t) + C\varphi(Ax(t), u(t))) \right).$$

Тогда уравнение $F\hat{x}(t) + Gu(t) + C\varphi(A\hat{x}(t), u(t)) = u_*(t)$ с вектором u_* размерности m разрешимо относительно переменных $u_1, u_2, \dots, u_m$ и согласно выражению (2) переменные $u_1, u_2, \dots, u_m$ могут



быть определены с помощью некоторых функций $g_1, g_2, \dots, g_m$ следующим образом:

$$u_i(t) = g_i(\hat{x}(t), u_{*1}(t), \dots, u_{*m}(t)), \quad 1 \leq i \leq m.$$

Простое аналитическое решение получается в частном случае, когда $\text{rank } G = m$ и $G^{-L}C = 0$, поскольку тогда

$$u(t) = G^{-L}(u_*(t) - F\hat{x}(t)).$$

Если $m' < m$, то, как и ранее, можно найти матрицу P , содержащую m' строк, удовлетворяющую условию $\text{rank} \left(\frac{\partial}{\partial(u_1, u_2, \dots, u_m)} (PGu(t) + PC\varphi(Ax(t), u(t))) \right) = m'$ для всех $x \in R^n$ и $u \in R^m$, и выразить переменные $u_1, u_2, \dots, u_{m'}$ из уравнения $P(F\hat{x}(t) + Gu(t) + C\varphi(A\hat{x}(t), u(t))) = u_*(t)$. Система (4) во всех рассмотренных случаях имеет вид

$$\dot{x}_{*i}^{(1)}(t) = u_{*i}(t), \quad 1 \leq i \leq m'.$$

7. ИЛЛЮСТРАТИВНЫЙ ПРИМЕР

Рассмотрим систему, описываемую моделью

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \begin{pmatrix} -\text{sign}(x_1(t)) + \ln(1 + u_1(t) + u_2(t)) \\ -x_1(t)x_2(t) + \ln(1 + u_1(t) - u_2(t) + x_1(t)u_3(t)) + x_3(t) - \vartheta(t) \\ x_4(t) - x_1(t)x_2(t) + \ln(1 + u_3(t)) - \vartheta(t) \\ x_3(t) - x_2(t) \exp(-x_4(t)) \\ x_1(t)x_2(t) + x_5(t) + \vartheta(t) \end{pmatrix}, \\ y(t) &= \begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_4(t) \\ x_5(t) \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Выберем следующие матрицы для ЛД описания системы:

$$\begin{aligned} F &= \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & -1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad G = 0, \\ L &= \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ -1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \\ A_1 &= (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0), \quad A_2 = (0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0), \\ A_3 &= (0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0), \quad A_4 = (0 \ -1 \ 1 \ 0 \ 0). \end{aligned}$$

В этом случае нелинейный член $\varphi(Ax(t), u(t))$ принимает вид

$$\varphi(Ax(t), u(t)) = \begin{pmatrix} -\text{sign}(A_1x(t)) + \ln(1 + u_1(t) + u_2(t)) + A_1x(t) \\ \ln(1 + u_1(t) - u_2(t) + A_1x(t)u_3(t)) \\ \ln(1 + u_3(t)) \\ A_4x(t) \exp(-A_3x(t)) - A_4x(t) + A_3x(t) \\ A_1x(t)A_2x(t) - A_1x(t) - A_2x(t) \end{pmatrix}.$$

$$\text{Найдем матрицу } L^0: L^0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}. \text{ Уравнение}$$

(7) имеет несколько линейно независимых решений:

$$(A^0 \ B^0 \ C^0) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \text{ Отсюда } \Phi =$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad F_0 = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & -1 \end{pmatrix}, \quad J_0 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$C_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad G_0 = 0, \quad s = 4. \text{ Поскольку произведе-}$$

ние $C_0\Phi$ не содержит нелинейности с переменной x_2 ,

найдем матрицы A_{01}, A_{03} и A_{04} из уравнения $A_i = A_0 \left(\frac{\Phi}{H} \right)$: $A_{01} = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0)$, $A_{03} = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0)$, $A_{04} = (0 \ -1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$. В результате система (3) описывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{x}_0(t) &= F_0x_0(t) + J_0y(t) + C_0\varphi \left(A_0 \begin{pmatrix} x_0(t) \\ y(t) \end{pmatrix}, u(t) \right) = \\ &= \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & -1 \end{pmatrix} x_0(t) + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} y(t) + \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \times \\ &\times \begin{pmatrix} -\text{sign}(A_{01}z(t)) + \ln(1 + u_1(t) + u_2(t)) + A_{01}z(t) \\ \ln(1 + u_1(t) - u_2(t) + A_{01}z(t)u_3(t)) \\ \ln(1 + u_3(t)) \\ A_{04}z(t) \exp(-A_{02}z(t)) - A_{04}z(t) + A_{03}z(t) \\ A_1x(t)A_2x(t) - A_1x(t) - A_2x(t) \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} -\text{sign}(y_1) + \ln(1 + u_1 + u_2) \\ \ln(1 + u_1 - u_2 + y_1u_3) + x_{03} \\ y_2 + y_3 + \ln(1 + u_3) \\ (x_{03}(t) - x_{02}(t)) \exp(-y_2(t)) \end{pmatrix}, \end{aligned}$$

где $z(t) = \begin{pmatrix} x_0(t) \\ y(t) \end{pmatrix}$. Из вида правой части уравнения для системы (3) следует, что $m' = m = 3$. Далее найдем матрицу $\frac{\partial}{\partial u}(C_0 \varphi(A_0 z, u))$:

$$\frac{\partial}{\partial u}(C_0 \varphi(A_0 z, u)) = \begin{pmatrix} \frac{1}{1+u_1+u_2} & \frac{1}{1+u_1+u_2} & 0 \\ \frac{1}{1+u_1-u_2+y_1u_3} & \frac{1}{1+u_1-u_2+y_1u_3} & \frac{y_1}{1+u_1-u_2+y_1u_3} \\ 0 & 0 & \frac{1}{1+u_3} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Так как $\text{rank}\left(\frac{\partial}{\partial u}(C_0 \varphi(A_0 z, u))\right) = 3$ для всех u (за исключением некоторых его значений, например, $u_3 = -1$), то $c = m' = 3$. Поскольку $s = 4 > c = 3$, необходимо найти матрицу P , удовлетворяющую условию (11).

$$\text{Наиболее простое решение имеет вид } P = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Легко проверить, что уравнение

$$P(F_0 x_0 + J_0 y + C_0 \varphi(A_0 z, u)) = \begin{pmatrix} -\text{sign}(y_1) + \ln(1+u_1+u_2) \\ \ln(1+u_1-u_2+y_1u_3) + x_{03} \\ y_2 + y_3 + \ln(1+u_3) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{*1} \\ u_{*2} \\ u_{*3} \end{pmatrix}$$

разрешимо для u_i , $1 \leq i \leq 3$, и

$$u_1 = 0,5 \exp(u_{*1} + \text{sign}(y_1)) + 0,5 \exp(u_{*2} - x_{03}) - 0,5 y_1 (\exp(u_{*3} - y_2 - y_3) - 1) - 1,$$

$$u_2 = 0,5 \exp(u_{*1} + \text{sign}(y_1)) - 0,5 \exp(u_{*2} - x_{03}) + 0,5 y_1 (\exp(u_{*3} - y_2 - y_3) - 1),$$

$$u_3 = \exp(u_{*3} - y_2 - y_3) - 1.$$

Три первые компоненты системы (4) имеют стандартный вид (10): $\dot{x}_{*i}^{(1)}(t) = u_{*i}(t)$, $1 \leq i \leq 3$. Поскольку $s = 4 > c = 3$, необходимо найти матрицу Q . Можно показать, что условие (13) приводит к матрице $Q^* = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$. Решение уравнения (14) дает $N^* = 1$, $F^* = -1$, $J^* = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 1 \end{pmatrix}$. Следовательно, $Q = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ и $C_* = QC_0 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$. Поскольку произведение $C_* \varphi$ содержит четвертую строку функции φ , из уравнения $A_i = A_i^* \Phi$ найдем матрицы A_{*3} и A_{*4} : $A_{*3} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$, $A_{*4} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$. Описание четвертой компоненты системы (4) может быть получено по аналогии с уравнением (3) в следующем виде:

$$\dot{x}_{*4}(t) = (x_{*3}(t) - x_{*2}(t)) \exp(-x_{*4}(t)).$$

Таким образом, построены системы Σ_0 и Σ_* , а также закон управления (2), на основе которых может осуществляться управление исходной системой при наличии в ней определенных дефектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках решения задачи аккомодации для системы, описанной моделью (1), применен логико-динамический подход, гарантирующий нахождение управления, полностью развязанного от воздействий, вызываемых дефектами. Особенность подхода состоит в применении линейных методов для нелинейных систем с линейной функцией выхода и динамикой определенного вида, что позволяет избежать сложных аналитических вычислений, характерных для алгебры функций и дифференциальной геометрии. Кроме того, логико-динамический подход дает возможность работать с нелинейными системами, содержащими недифференцируемые нелинейности.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Diagnosis and Fault Tolerant Control* / M. Blanke, M. Kinnaert, J. Lunze, M. Staroswiecki. — Berlin: Springer-Verlag, 2003.
2. *Staroswiecki M., Yang H., Jiang B.* Progressive accommodation of aircraft actuator faults // Proc. of the IFAC Symposium Safeprocess'2006. — Beijing, PR China, 2006. — P. 877–882. — (CD-ROM).
3. *Weng Z., Patton R., Cui P.* Active fault-tolerant control of a double inverted pendulum // Proc. of the IFAC Symposium Safeprocess'2006. Beijing, PR China, 2006. — P.1591–1596. — (CD-ROM).
4. *Staroswiecki M.* Fault tolerant control: the pseudo-inverse method revisited // Proc. of the 16th IFAC Congress. Prague, Czech Republic, 2005. — (CD-ROM).
5. *Jang B., Staroswiecki M., Cocquemot V.* Active fault tolerant control for a class nonlinear systems // Proc. of the IFAC Symposium Safeprocess'03. — Washington, 2003. — P. 127–132. — (CD-ROM).
6. *Шумский А.Н., Жирабок А.Н.* Метод аккомодации нелинейных динамических систем к дефектам // Изв. РАН. Теория и системы управления. — 2009. — № 4. — С. 62–70.
7. *Zhirabok A., Ustoltsev S.* Fault diagnosis in nonlinear dynamic systems via linear methods // Proc. 15 IFAC World Congress. — Barcelona, Spain, July 2002. — (CD-ROM).
8. *Жирабок А.Н., Усольцев С.А.* Линейные методы при диагностировании нелинейных систем // Автоматика и телемеханика. — 2000. — № 7. — С. 149–159.
9. *Жирабок А.Н.* Нелинейные соотношения паритета: логико-динамический подход // Автоматика и телемеханика. — 2008. — № 6. — С. 160–174.

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Ю. Рутковским.

Шумский Алексей Евгеньевич — д-р техн. наук, вед. науч. сотрудник, Институт проблем морских технологий ДВО РАН, г. Владивосток,

Жирабок Алексей Нилович — д-р техн. наук, профессор, Дальневосточный государственный технический университет, г. Владивосток,

Бобко Евгений Юрьевич — ассистент, Дальневосточный государственный технический университет, г. Владивосток,

☎ (4232) 45-08-64, ✉ zhirabok@mail.ru.



ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКА СКЛОННОСТИ СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ К ВЫРОЖДЕНИЮ

Н.А. Дударенко, М.В. Полякова, А.В. Ушаков

Рассмотрена проблема экспресс-оценки склонности к системному вырождению сложных динамических систем. Предложен алгоритм оценки функционала вырождения с помощью робастных вычислительных процедур. Выдвинутые положения проиллюстрированы примером.

Ключевые слова: экспресс-оценка, функционал вырождения, сложная система, критериальная матрица, робастная вычислительная процедура.

ВВЕДЕНИЕ

Сложная техническая система (СТС) типа «многомерный вход—многомерный выход» (МВМВ) реализует линейный (локально линейный) оператор, отображающий «пространство намерений» в «пространство осуществляемых реализаций». Математически вырождение линейного оператора означает сокращение размерности его образа [1, 2], т. е. уменьшение ранга этого оператора. Вырождение линейного оператора, реализуемого СТС типа МВМВ, переносится на систему, и далее в таком смысле понимается термин «вырождение сложной системы».

Ранг оператора, который в пользовательской среде заменяется на матрицу оператора, зависящую от базиса представления, является целочисленной характеристикой и изменяется скачкообразно при плавном изменении параметров элементов матрицы оператора. В этой связи возникает потребность в таком инструментарии, который позволил бы непрерывно оценивать появляющуюся в системе тенденцию к возможному ее вырождению. Этот инструментальный строится на использовании сингулярного разложения [1, 2] критериальных матриц, в основном применительно к отношению «вход—выход» СТС типа МВМВ, позволяющего конструировать функционалы вырождения, с помощью которых можно оценить склонность системы к вырождению.

При исследовании вырождения СТС можно выделить три возможных версии его проявления:

функциональное вырождение, физическое вырождение и системное вырождение [3, 4].

Первая версия предполагает, что СТС типа МВМВ оказывается вырожденной функционально в силу технологической необходимости функционирования ее агрегатных компонентов как единого целого. Наиболее наглядными примерами служат технологические процессы обработки материальных потоков, состоящие в формировании и подаче ленточного материала в листопрокатном производстве, в производстве бумаги и тканей, в организации заготовительных процессов в составе «бесскладовых» технологических производств, процессы динамической юстировки многокомпонентных оптических и радиооптических систем в режиме рабочей эксплуатации и т. д. [4]. Примерами технологических процессов по обслуживанию потоков могут служить процессы движения строим подвижных технических средств, управляемых антропокомпонентами-операторами (строй самолетов, вертолетов, автомобилей и т. п.), и автономных антропокомпонентов (строй военнослужащих, команда гребцов и т. п.)

Вторая версия проявления вырождения предполагает сохранение способности нормального функционирования технологического оборудования МВМВ-системы в условиях, когда его функционирование физически приостанавливается. Это может произойти при отключении технологического оборудования от энергосистемы (по причинам экономического или техногенного характера), по причинам иссякания экзогенного потока заявок в силу утраты интереса потребительской среды к продукции, производимой данным поколением

технологического оборудования. Причиной тому могут быть факторы, сопровождающиеся физическим выпадением некоторого важного компонента из функционального состава МВМВ-системы.

Третья версия проявления вырождения, названная системной, порождается системными факторами, характеризующимися организационными причинами, состоящими в возможности неправильного распределения заявок по входам, в возможности неправильного согласования динамики потоков заявок с динамикой сепаратных каналов. Система может вырождаться по причине структурной и параметрической природы, когда в системе возникают нежелательные межканальные связи или если эти связи являются структурными компонентами, но коэффициенты передачи этих связей назначены неудачно, когда неудачно сформированы полосы пропускания сепаратных каналов, а в случае, если природа системы дискретная, неудачно назначены и распределены по каналам интервалы дискретности и т. д. [3].

Применяемый авторами инструментарий контроля вырождения СТС основан на использовании возможностей аппарата функционалов вырождения, позволяющего дать численную оценку близости сложной МВМВ-системы к вырождению, сопровождающегося частичной или полной потерей ее работоспособности.

Технология контроля системного вырождения СТС сформировалась как двухфазный процесс. В первой фазе конструируются критериальные матрицы, чаще всего применительно к отношению «вход—выход» при различных способах задания «динамических намерений». Во второй фазе конструируются функционалы вырождения как инструмент численной оценки вырождения.

В работе основное внимание сосредоточено на вычислительных проблемах экспресс-оценки системной версии проявления вырождения сложной МВМВ-системы с помощью аппарата функционалов вырождения.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Поставим задачу конструирования критериальных матриц для случая конечномерного задания «динамических намерений». Пусть сложная динамическая МВМВ-система задана векторно-матричным описанием

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Fx(t) + Gg(t); \quad x(0) = x(t)|_{t=0}, \\ y(t) &= Cx(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где x , g и y — векторы состояния, задающего воздействия и выхода соответственно: $x \in R^n$, $g, y \in R^m$, F , G и C — матрицы, размерности которых согла-

сованы с размерностями векторов x , g и y так, что $F \in R^{n \times n}$, $G \in R^{n \times m}$, $C^T \in R^{m \times n}$.

Непрерывная динамическая МВМВ-система, представленная в виде (1), предназначена для обработки входных заявок $g(t)$, моделируемых векторной выходной переменной автономной системы

$$\dot{z}(t) = Ez(t), \quad z(0) = z(t)|_{t=0}, \quad g(t) = Pz(t), \quad (2)$$

именуемой источником конечномерного задающего воздействия, в котором $z \in R^l$, $E \in R^{l \times l}$, $P \in R^{m \times l}$ — соответственно векторы, согласованные по размерностям матрицы источника задающего воздействия, который выбирается минимальной размерности, но такой, чтобы его выход

$$g(t) = Pz(t), \quad (3)$$

где $z(t) = e^{Et}z(0)$, на множестве начальных состояний $z(0)$ адекватно представлял весь класс конечномерных задающих воздействий системы. Для целей дальнейших исследований воспользуемся следующими утверждениями.

Утверждение 1. Если матрицы описаний (1) и (2) связаны матричным уравнением Сильвестра

$$TE - FT = GP, \quad (4)$$

то решение системы (1) может быть представлено в форме

$$x(t) = e^{Ft}x(0) + (Te^{Et} - e^{Ft}T)z(0),$$

$$y(t) = Cx(t) = Ce^{Ft}x(0) + C(Te^{Et} - e^{Ft}T)z(0). \quad \blacklozenge$$

Доказательство утверждения 1 можно найти в работе [5].

Если в движении по выходу $y(t)$ выделить все компоненты: свободное $y_{св}(t)$ и вынужденное $y_{в}(t)$, переходное $y_{п}(t)$ и установившееся $y_{у}(t)$ движения, то по этим компонентам можно сформировать четыре линейные алгебраические задачи (ЛАЗ), параметризованные непрерывным временем t и имеющие представления:

$$\left. \begin{aligned} y_{св}(t) &= Ce^{Ft}x(0) = N_{св}(t)x(0), \\ y_{в}(t) &= C(Te^{Et} - e^{Ft}T)z(0) = N_{в}(t)z(0), \\ y_{п}(t) &= -Ce^{Ft}Tz(0) = N_{п}(t)z(0), \\ y_{у}(t) &= CTe^{Et}z(0) = N_{у}(t)z(0). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Вид каждой критериальной матрицы из банка (5) определяется следующими факторами: модель МВМВ-системы (1), вид конечномерного задающего воздействия, определяемого парой матриц (E , P), и решение матричного уравнения Сильвестра (4) в виде матрицы T . Конкретный выбор кри-



критериальной матрицы из банка (5) определяется предметом исследования.

Поставим задачу конструирования функционалов вырождения критериальных матриц банка ЛАЗ (5), полученных применительно к сложной динамической МВМВ-системе (1) путем приведенных векторно-матричных преобразований.

Для придания результатам большей общности запишем ЛАЗ в форме

$$\eta(w) = N(w)\chi(w), \quad (6)$$

где $N(w)$ — $m \times m$ критериальная матрица параметризована переменной w ; w принимает смысл непрерывного времени t , когда ЛАЗ (6) параметризована непрерывным временем, и смысл дискретного времени k , выраженного в числе интервалов дискретности длительности Δt , когда ЛАЗ (6) параметризована дискретным временем; $\eta(w)$, $\chi(w)$ — m -мерные векторы, причем $\chi(w)$ может принимать смысл $\chi(0)$.

Для экспресс-оценки склонности к системному вырождению исследуем сложную динамическую систему в алгебраической постановке вида (6) с критериальной матрицей N с помощью аппарата функционалов вырождения J_{Dv} [4].

Аппарат функционалов вырождения J_{Dv} строится на спектре $\sigma_\alpha\{N\}$ сингулярных чисел [1, 2] α_j , $j = \overline{1, m}$, критериальной матрицы N , так что они задаются с помощью соотношения

$$J_{Dv} = \alpha_v/\alpha_1; \quad v = \overline{m, 1}, \quad (7)$$

$$\sigma_\alpha(N) = \{\alpha_j = |\mu_j^{1/2}| : \mu_i : \det(\mu I - N^T N) = 0; \\ j = \overline{1, m}\}.$$

Функционалы вырождения (7) обладают следующими свойствами.

Свойство 1. Функционалы вырождения J_{Dv} критериальной матрицы N удовлетворяют неравенствам $0 \leq J_{Dv}(N) \leq 1$, $v = \overline{1, m}$.

Свойство 2. Функционалы вырождения J_{Dv} критериальной матрицы N не зависят от умножения этой матрицы на скаляр α , в общем случае параметризованный некоторым параметром γ , так что $\alpha = \alpha(\gamma)$, что представимо в форме $J_{Dv}(\alpha(\gamma)N) = J_{Dv}(N) = J_{Dv}$, $v = \overline{1, m}$.

Свойство 3. Функционалы вырождения J_{Dv} критериальной матрицы N не зависят от умножения критериальной матрицы слева или справа на ортогональную матрицу [1, 2].

Свойство 4. Глобальный функционал вырождения $J_G(N)$ является обратным числу обусловленности $C(N)$:

$$J_G(N) = C^{-1}(N). \quad (8)$$

Свойство 5. Глобальные функционалы вырождения J_G матриц N и N^{-1} совпадают, т. е. $J_G(N) = J_G(N^{-1})$. ♦

В завершение рассмотрения свойств функционалов вырождения отметим важное алгебраическое свойство глобального функционала вырождения $J_G(N)$, которое оформим в виде утверждения.

Утверждение 2. Величина J_G^{-1} , обратная глобальному функционалу J_G вырождения, — число обусловленности $C(N)$ выступает в качестве коэффициента усиления относительных погрешностей задания δ_N и δ_χ матрицы N и вектора χ ЛАЗ (8) в задаче оценки относительной погрешности δ_k решения ЛАЗ в форме

$$\delta_k \leq J_G^{-1}\{N\}(\delta_N + \delta_\chi + \delta_N \delta_\chi) = \\ = C\{N\}(\delta_N + \delta_\chi + \delta_N \delta_\chi). \quad \blacklozenge$$

Доказательство можно найти в работах [2, 6, 7].

У алгебраического свойства глобального функционала вырождения $J_G(N)$ широкие возможности применения. Например, если $\delta_\chi = 0$, $\delta_N = 0,01$ (1 %) при $J_G(N) = 0,01$, то оценка $\hat{\delta}_k = J_G^{-1}(N)(\delta_N + \delta_\chi + \delta_N \delta_\chi)$ относительной ошибки δ_k решения ЛАЗ составит величину $\hat{\delta}_k = 1$ (100 %).

Из полученных выражений для функционалов вырождения нетрудно видеть, что они количественно зависят от вида критериальной матрицы, которая конструируется на основе свойств динамических МВМВ-систем, вида входных заявок и сформулированной задачи исследования: параметризованной временем в случае, когда интерес представляют временные показатели процесса вырождения, или не параметризованной, когда интерес представляет проблема правильного распределения заявок по каналам системы. Далее задача решается в предположении, что критериальная матрица задана и параметр $w = t$ фиксирован.

Выделим задачу, в которой не требуется исследование тонкой природы процесса вырождения, а достаточно сформировать экспресс-оценку склонности сложной МВМВ-системы к системному вырождению. Для этого достаточно воспользоваться глобальным функционалом вырождения $J_G(N)$, определяемого выражением (8). Если его значение зафиксировано на уровне $J_G(N) \cong 0,01$, то разра-

ботчик должен насторожиться, если же его значение существенно меньше указанного, то следует запретить эксплуатацию системы.

2. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ ВЫРОЖДЕНИЯ СЛОЖНОЙ СИСТЕМЫ

Вычислительные проблемы экспресс-оценки склонности сложной динамической МВМВ-системы к вырождению связаны с представлением глобального функционала в форме (8). В силу свойства 4 глобальный функционал вырождения $J_G(N)$ обратен числу обусловленности матрицы N , определяемому [1, 2] выражением

$$C(N) = \|N\| \cdot \|N^{-1}\|. \quad (9)$$

Для нахождения числа обусловленности требуется обращение матрицы и может быть использована любая матричная норма. Обращение матрицы, в случае близости критериальной матрицы к вырождению, может представлять собой сложную вычислительную проблему. Поэтому робастные вычислительные процедуры в целях экспресс-оценки склонности сложных динамических систем к вырождению на первом этапе сосредоточены на возможности исключения процедуры обращения матрицы при расчетах. Полезно воспользоваться следующим утверждением.

Утверждение 3. Обратная матрица N^{-1} может быть представлена конечным степенным рядом по положительным степеням матрицы N в форме

$$N^{-1} = a_n^{-1} \left(N^{n-1} + \sum_{i=1}^{n-1} a_i N^{n-1-i} \right), \quad (10)$$

где $a_n, a_i, i = \overline{1, n}$, — коэффициенты характеристического полинома

$$D(\lambda) = \det(\lambda I - N) = \lambda^n + a_1 \lambda^{n-1} + a_2 \lambda^{n-2} + \dots + a_{n-1} \lambda + a_n.$$

Доказательство строится на использовании теоремы Гамильтона—Кэли [1], в соответствии с которой квадратная матрица обнуляет свой характеристический полином, т. е.

$$D(N) = \det(\lambda I - N)|_{\lambda=N} = N^n + a_1 N^{n-1} + a_2 N^{n-2} + \dots + a_{n-1} N + a_n I = 0, \quad (11)$$

где 0 — $n \times n$ нулевая матрица.

Умножим матричный полином (11) на матрицу N^{-1} , в результате получим выражение

$$N^{(n-1)} + a_1 N^{(n-2)} + \dots + a_{n-1} I + a_n N^{-1} = 0,$$

разрешаемое относительно матрицы N^{-1} в форме соотношения

$$a_n N^{-1} = - \left(N^{n-1} + \sum_{i=1}^{n-1} a_i N^{n-1-i} \right),$$

приводимого к виду (10). ♦

Примечание. Если матрица N обладает минимальным аннулирующим многочленом $\psi(\lambda)$ [1], степень n_ψ которого меньше степени n характеристического полинома $D(\lambda)$, то он позволяет упростить вычисление обратной матрицы N^{-1} в виде матричного полинома по положительным степеням матрицы N , меньшим числом членов в силу выполнения неравенства $n_\psi < n$. ♦

Представление обратной матрицы N^{-1} в форме (10) порождает дополнительную проблему, связанную с вычислением коэффициентов a_i характеристического полинома матрицы N , которая особенно остро встает в случае ее высокой размерности. Эта проблема удачно решается с помощью алгоритма Фаддеева—Леверье [1] разложения резольвенты матрицы. Воспользуемся следующим утверждением.

Утверждение 4. Резольвента $(\lambda I - N)^{-1}$ матрицы N представима разложением по положительным целым степеням скалярной переменной λ с матричными $n \times n$ коэффициентами $H_i, i = \overline{0, n-1}$ вида

$$(\lambda I - N)^{-1} = (\lambda^n + a_1 \lambda^{n-1} + \dots + a_{n-1} \lambda + a_n)^{-1} \times \\ \times (\lambda^{n-1} H_0 + \lambda^{n-2} H_1 + \dots + H_{n-1}),$$

в котором элементы H_i и $a_{i+1}, i = \overline{0, n-1}$ вычисляются с помощью рекуррентной процедуры Фаддеева—Леверье

$$\begin{aligned} H_0 &= I, & a_1 &= -\text{tr}(NH_0), \\ H_1 &= NH_0 + a_1 I, & a_2 &= -\text{tr}(NH_1)/2, \\ &\vdots & &\vdots \\ H_k &= NH_{k-1} + a_k I, & a_{k+1} &= -\text{tr}(NH_k)/k, \\ & & k &= \overline{0, n-1}. \end{aligned} \quad (12)$$

Доказательство утверждения 4 можно найти в работе [1].

Нетрудно видеть, что рекуррентная процедура Фаддеева—Леверье (12) в части, описывающей процесс формирования коэффициентов характеристического уравнения матрицы N , позволяет воспользоваться выражением (10) для формирования матрицы N^{-1} .

Обозначим еще одну вычислительную проблему. Строго говоря, глобальный функционал вы-



рождения $J_G(N)$ обладает свойством 4 только тогда, когда в выражении для числа обусловленности (9) используется спектральная норма $\|(\cdot)\|_2$, т. е.

$$J_G(N) = (\{C_2(N) = \|N\|_2 \|N^{-1}\|_2\})^{-1}. \quad (13)$$

Известно, что спектральная норма матрицы достаточно трудно вычисляется [8]. Для ее вычисления обычно прибегают к сингулярному разложению матрицы с помощью SVD-процедуры [9, 10], обладающей своими вычислительными трудностями.

Поставим задачу перехода от точного значения функционала вырождения в форме (11) к его оценке, которая строится на оценках спектральных норм матриц N и N^{-1} . Для спектральной нормы $\|N\|_2$ произвольной квадратной матрицы N справедлива оценка [2]

$$\|N\|_2 \leq (\|N\|_1 \|N\|_\infty)^{1/2}, \quad (14)$$

где $\|N\|_1$ и $\|N\|_\infty$ — соответственно столбцовая и строчная нормы матрицы N [8], определяемые как максимум суммы абсолютных значений элементов соответственно по столбцам и строкам матрицы N . Выражение (14) позволяет ввести в рассмотрение оценку $\|\hat{N}\|_2$ нормы $\|N\|_2$ в форме

$$\|\hat{N}\|_2 = (\|N\|_1 \|N\|_\infty)^{1/2} \quad (15)$$

и аналогичную оценку

$$\|\hat{N}^{-1}\|_2 = (\|N^{-1}\|_1 \|N^{-1}\|_\infty)^{1/2}. \quad (16)$$

С помощью оценок (15) и (16) можно ввести в рассмотрение оценку $\hat{J}_G\{N\}$ глобального функционала $J_G\{N\}$, задаваемой в силу формулы (13) выражением

$$\hat{J}_G\{N\} = (\|\hat{N}\|_2 \|\hat{N}^{-1}\|_2)^{-1}. \quad (17)$$

Робастная вычислительная процедура применительно к оценке $\|\hat{N}^{-1}\|_2$ в силу выражения (10) принимает вид

$$\|\hat{N}^{-1}\|_2 = \left\{ \left\| a_n^{-1} \left(N^{(n-1)} + \sum_{i=1}^{(n-1)} a_i N^{(n-1-i)} \right) \right\|_1 \times \right. \\ \left. \times \left\| a_n^{-1} \left(N^{(n-1)} + \sum_{i=1}^{(n-1)} a_i N^{(n-1-i)} \right) \right\|_\infty \right\}^{1/2}. \quad (18)$$

Соотношения (10), (12), (16)—(18) позволяют сформировать алгоритм формирования оценки глобального функционала вырождения, который опирается на робастные вычислительные процедуры в задаче экспресс-оценки склонности сложных динамических систем к вырождению.

3. АЛГОРИТМ ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ

Алгоритм экспресс-оценки склонности сложной динамической системы к вырождению с помощью робастных вычислительных процедур состоит в следующем.

1. Сформировать (или получить от заказчика) критериальную матрицу N на основе векторно-матричного описания сложной динамической системы вида (1), аналитического представления (2), (3) механизма формирования «динамических намерений» и их распределения по сепаратным входам системы.

2. Вычислить коэффициенты характеристического полинома матрицы N с помощью рекуррентной процедуры Фаддеева—Леверье (12).

3. Представить матрицу N^{-1} в виде конечного ряда по положительным степеням матрицы N в форме (10), используя коэффициенты ее характеристического полинома, вычисленные в п. 2.

4. Вычислить столбцовые и строчные нормы матриц N и N^{-1} в соответствии с определением [10].

5. Вычислить оценки спектральных норм $\|\hat{N}\|_2$ и $\|\hat{N}^{-1}\|_2$ в форме (15) и (18).

6. Вычислить значение оценки $\hat{J}_G\{N\}$ (17) глобального функционала вырождения.

7. Передать полученное значение оценки $\hat{J}_G\{N\}$ системному аналитику на предмет экспресс-оценки склонности сложной динамической системы к вырождению.

Пример. Проиллюстрируем разработанный алгоритм.

1. Сформируем (получим от заказчика на исследование) критериальную матрицу

$$N = \begin{bmatrix} 33 & -160 & 175 & 270 \\ 9 & 175 & -750 & 200 \\ 1 & 270 & 200 & -11000 \\ 70800 & 63850 & 18000 & 1900 \end{bmatrix}.$$

2. Вычислим коэффициенты характеристического полинома матрицы N с помощью алгоритма Фаддеева—Леверье: $a_1 = -2308$; $a_2 = 167140340$; $a_3 = -420864811625$; $a_4 = 838609761624995$.

3. Вычислим матрицу N^{-1} с помощью формулы (10), используя результаты п. 2:

$$N^{-1} = \begin{bmatrix} 0,0067 & 0,00187 & 0,0002 & 0,000011 \\ -0,00695 & -0,0016 & -0,0002 & 0,0000034 \\ -0,0016 & -0,0017 & -0,00007 & 0,00000096 \\ -0,0002 & -0,00007 & -0,0001 & 0,0000001 \end{bmatrix}.$$

4. Вычислим столбцовые и строчные нормы матриц N и N^{-1} : $\|N\|_1 = 70843$, $\|N\|_\infty = 154550$, $\|N^{-1}\|_1 = 0,0142$, $\|N^{-1}\|_\infty = 0,0088$.

5. Вычислим оценки спектральных норм $\|\hat{N}\|_2$ и $\|\hat{N}^{-1}\|_2$: $\|\hat{N}\|_2 = 1,0464 \cdot 10^5$; $\|\hat{N}^{-1}\|_2 = 0,0116$.

6. Вычислим значение оценки (17): $\hat{J}\{N\} = 0,008$

7. Передать полученное значение оценки $\hat{J}_G\{N\}$ глобального функционала $J_G\{N\}$ вырождения системному аналитику на предмет экспресс-оценки склонности сложной динамической системы к вырождению, дав рекомендацию на приостановку эксплуатации сложной системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оболочка Matlab любых версий, которая стала рабочим инструментом исследователя динамических систем, с ростом размерности последних, обнаруживает свои вычислительные слабости [11]. Это заметно проявляется, начиная с размерности выше шестой, при осуществлении матричных преобразований, особенно при решении матричных уравнений [8]. В таких случаях исследователю приходится составлять авторские программы. Авторы надеются, что материалы, предлагаемые вниманию читателей статьи, могут оказаться полезными при решении задач оценки склонности динамической системы к вырождению.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. — М.: Наука, 1973. — 576 с.
2. Голуб Дж., Ван Лоун Ч. Матричные вычисления / Пер. с англ. — М.: Мир, 1999. — 548 с.
3. Дударенко Н.А., Полякова М.В., Ушаков А.В. Проблема вырождения производственной динамической системы, порожаемой фактором усталости ее антропокомпонентов // Изв. вузов. Приборостроение. — 2009. — Т. 52. — № 11. — С. 62—67.
4. Дударенко Н.А., Полякова М.В., Ушаков А.В. Достаточные алгебраические условия обобщенной синхронизируемости многоканальных динамических объектов // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2009. — № 5. — С. 17—20.
5. Ушаков А.В. Модальные оценки качества процессов в линейных многомерных системах при внешних конечномерных воздействиях // Автоматика и телемеханика. — 1992. — № 11. — С. 72—82.
6. Воеводин В.В., Кузнецов Ю.А. Матрицы и вычисления. — М.: Наука, 1984. — 584 с.
7. Райс Дж. Матричные вычисления и математическое обеспечение / Пер. с англ. — М.: Мир, 1984. — 264 с.
8. Икрамов Х.Д. Численное решение матричных уравнений / Под ред. Д.К. Фаддеева. — М.: Наука, 1984. — 192 с.
9. Ланкастер П. Теория матриц / Пер. с англ. — М.: Наука, 1984. — 464 с.
10. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулдер К. Машинные методы математических вычислений / Пер. с англ. — М.: Мир, 1980. — 280 с.
11. Чертков К.Г., Петров Ю.П. Ошибки, обнаружившиеся в пакете MATLAB // Тр. второй всерос. конф. «Проектирование научных и инженерных приложений в среде MATLAB» / ИПУ РАН, 2004. — М., 2004. — С. 318—324.

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Н. Афанасьевым.

Дударенко Наталья Александровна — канд. техн. наук, доцент,
✉ dudarenko@yandex.ru,

Полякова Майя Вячеславовна — аспирантка, ✉ 12noch@mail.ru;

Ушаков Анатолий Владимирович — д-р техн. наук, профессор,
✉ Ushakov-AVG@yandex.ru,

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий механики и оптики,
☎ (812) 595-41-28.

VII Всероссийская школа-конференция молодых ученых Управление большими системами

Пермь, 27 - 29 мая 2010 г.



Школа-конференция организована Институтом проблем управления РАН, Министерством образования и науки Пермского края, Пермским государственным техническим университетом и другими ведущими в области теории управления и ее приложений научными и образовательными учреждениями.

Основные направления работы конференции:

- общая теория управления;
- управление сложными технологическими процессами и производствами;
- управление социальными и экономическими системами;
- информационные технологии в управлении.

Приглашаются к участию молодые ученые (студенты и аспиранты, кандидаты наук в возрасте до 35 лет, доктора наук — в возрасте до 40 лет). Наряду с выступлениями молодых ученых планируется цикл лекций ведущих специалистов по теории управления и применению информационных технологий в управлении большими системами. Возможно заочное участие.

UPL: <http://UBS2010.pstu.ru>, ✉ ck@pstu.ru, ☎/ф 8-342-219-80-29.

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЫСОКОРИСКОВЫМИ ИННОВАЦИОННЫМИ ПРОЕКТАМИ В НАУКОЕМКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Н.В. Иванова, В.В. Клочков

Обоснована необходимость реализации высокорисковых инновационных проектов в российской наукоемкой промышленности. Основное внимание уделено отраслям, производящим дорогостоящую продукцию с длительным жизненным циклом. Проведен анализ основных рисков, предложена модель оптимальной диверсификации поисковых исследований.

Ключевые слова: «прорывные» продукты, временная конкуренция, эффект блокировки, поисковые исследования, риск, диверсификация.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на декларации руководителей отечественных предприятий о готовности к инновациям, реальная инновационная активность даже наукоемкого и высокотехнологичного сектора российской промышленности чрезвычайно низка [1]. Анализируя причины такого положения дел, не следует считать заинтересованность бизнеса в инновациях само собой разумеющейся. Помимо субъективных факторов (консерватизм и т. п.), существует и ряд объективных препятствий. Разумеется, никакие инновационные решения не являются априори выгодными для всех заинтересованных сторон. Возникают проблемы согласования интересов, в том числе и внутри фирм. Их решению посвящено множество работ (см., например, [2]). Однако заинтересовано ли предприятие в целом или конкретная наукоемкая отрасль российской экономики в инновационных разработках? Ответ на этот вопрос должен быть подкреплён объективными расчётными оценками, иначе инновационная деятельность (требующая значительных затрат) и далее будет подменяться декларациями.

Как известно, нынешняя доля российской промышленности на мировом рынке наукоемкой продукции пренебрежимо мала (в различных отраслях — от долей процента до нескольких процентов, см., например, работу [1]). Перед боль-

шинством российских предприятий, принадлежащих к наукоёмким отраслям, стоит задача выхода на мировой рынок, занятый конкурентами или хотя бы возвращения на отечественный рынок, утраченный за последние годы. При этом следует учитывать, что производственные мощности зарубежных компаний позволяют полностью удовлетворять существующий и перспективный платежеспособный спрос, т. е. рынки отнюдь не ждут российских производителей. Насыщение рынка изделий длительного пользования продукцией зарубежных производителей¹ означает, что даже конкурентоспособная отечественная продукция не будет пользоваться спросом на протяжении многих лет, что делает бессмысленным ее создание.

Для выхода на новые или ранее утраченные рынки мало предложить потребителям продукт, сравнимый с продукцией конкурентов. В настоящее время российской промышленности необходимы не просто конкурентоспособные продукты, а «прорывные», т. е. такие, чтобы потенциальные заказчики (транспортные и энергетические компании, производственные предприятия и т. д.) добровольно заменили продукцию конкурентов — да-

¹ Этот процесс активно идет во многих отраслях — так, например, из 99 магистральных пассажирских самолетов, закупленных в 2002—2005 гг. российскими авиакомпаниями, лишь 17 — новые изделия отечественного производства, и 82 — импортные (в том числе приобретенные на вторичном рынке).

же не исчерпавшую свой срок службы — на новые отечественные изделия. Такое определение позволяет выработать объективные критерии «прорывного» продукта, что необходимо, поскольку само это понятие стало в последнее время объектом недобросовестных спекуляций. В отсутствие таких критериев вероятно непродуктивное использование ресурсов (в том числе, средств, выделяемых из госбюджета) в том случае, если планы прорыва на новые рынки не оправдаются.

В работе [3] показано, что для изделий длительного пользования приведенное условие выполняется, если стоимость приобретения новых изделий ниже выигрыша в уровне эксплуатационных затрат². Однако выполнение указанного неравенства в большинстве отраслей становится все менее вероятным. С одной стороны, стоимость изделий возрастает прогрессирующим образом, а с другой — становится все труднее достичь значимого сокращения эксплуатационных затрат. Это вызвано исчерпанием возможностей развития существующих технологий. Следовательно, в большинстве наукоемких отраслей достижение российскими предприятиями «прорывного» превосходства над зарубежными конкурентами и желаемый выход на занятые конкурентами рынки не могут быть достигнуты благодаря имеющемуся научно-технологическому заделу. Российская наукоемкая промышленность объективно заинтересована в инновациях не потому, что это абстрактно «хорошо», а потому, что вывод на рынки инновационной продукции — необходимое условие выживания в глобальном конкурентном окружении. При исчерпании возможностей традиционных технологий приходит время высокорисковых, радикальных инноваций. Их планирование и реализация обладают рядом важных особенностей. В данной работе предпринята попытка анализа этой специфики с помощью экономико-математического моделирования.

1. РИСКИ РЕАЛИЗАЦИИ ИННОВАЦИОННЫХ РАЗРАБОТОК В НАУКОЕМКИХ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Традиционно принято считать, что реализация инновационных проектов, обладающих большой степенью технологической новизны, сопряжена с высокими рисками (см., например, работу [4]). Однако, как показывает изложенный анализ, в

нынешней ситуации традиционные решения, не обладающие «прорывными» характеристиками, заведомо не обеспечивают объемов спроса на продукцию, достаточных для рентабельной реализации новых проектов, — т. е. традиционные (низкорисковые) технологические решения гарантируют провал. В этих условиях риск, т. е. возможность неблагоприятного исхода³ реализации инновационных решений, неизбежен и, в то же время, вполне приемлем.

Согласно распространенной классификации научно-исследовательских работ (НИР) [6], фундаментальные НИР направлены на открытие новых явлений, законов природы и т. п. Как правило, они характеризуются отложенным во времени эффектом и проводятся не в интересах конкретной отрасли или компании. Поэтому вопросы их организации (чрезвычайно сложные и специфические) не входят в сферу интересов инновационного менеджмента. Возможность же достижения «прорывного» улучшения параметров продукции на основе имеющегося фундаментального научного задела определяется в ходе так называемых *поисковых НИР*. Именно их организации в данной работе уделяется первостепенное внимание.

Когда уже определены решения, необходимые для достижения целевого уровня характеристик перспективной продукции, начинаются *опытно-конструкторские работы* (ОКР) и *технологическая подготовка производства* (ТПП). Их реализация поддается относительно точному прогнозированию и планированию, подробнее см. работу [6]. Но поисковые исследования, нацеленные на поиск «прорывных» решений, могут завершиться успехом⁴ в случайный момент времени. Поэтому инновационные разработки сопряжены со следующими основными видами рисков (если считать, что целевой уровень параметров перспективной продукции достижим на базе имеющегося фундаментального задела, и будет рано или поздно достигнут):

- 1) перерасход средств на разработку продукта;
- 2) затягивание сроков его разработки.

Традиционно первоочередное внимание уделяется первому виду рисков (см., например, работу [4]), однако в наукоемких и высокотехнологичных отраслях именно временной фактор приобретает решающее значение. Эти отрасли промышленности обладают, помимо прочих, следующей важной

³ См., например, определение риска, данное в монографии [5].

⁴ Подчеркнем, что под успехом подразумевается разработка инновационного продукта с заданным (причем, «прорывным») уровнем характеристик — в противном случае, как было отмечено, его создание и вывод на рынок могут быть заведомо бессмысленны.



особенностью. Поскольку в них высока доля квалифицированного труда и операций, слабо поддающихся формализации и автоматизации, сильно проявляется так называемый *эффект обучения*. Он состоит в снижении удельных трудозатрат на единицу продукции с ростом накопленного выпуска и опыта работы. Так, например, в авиастроении удельные трудозатраты падают на 15–20 % при каждом удвоении накопленного выпуска изделий [7]. Данный эффект обуславливает исключительную важность фактора времени вывода новой продукции на рынок. Фирма-лидер успевает к моменту выхода последователей на рынок накопить значительный опыт производства новой продукции и существенно снизить ее себестоимость. Кроме того, продукция лидера уже эксплуатируется на протяжении ряда лет, приобретая дополнительные конкурентные преимущества в глазах потребителей. В итоге фирмы-последователи могут столкнуться с так называемым *эффектом блокировки* [8]: при некотором пороговом запаздывании относительно лидера, им становится бессмысленно выходить на рынок. Жесткая временная конкуренция на рынках высокотехнологичной продукции требует специфических стратегий инновационной деятельности.

2. АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИВЕРСИФИКАЦИИ ПОИСКОВЫХ НИР

Традиционно рекомендуется (см., например, работу [6]) сосредоточить усилия и ресурсы компании на наиболее перспективном направлении поисковых исследований. Однако основная проблема состоит в определении такого направления. Даже если бы это было принципиально возможно, выделение приоритетов неизбежно сопряжено с внутрифирменными конфликтами (подробнее см. работу [2]), в которых далеко не всегда одержат верх сторонники действительно наилучшего варианта. Но важнейшая особенность поисковых НИР состоит именно в том, что их успех не гарантирован, и время достижения успеха чрезвычайно неопределенное. Поэтому, вопреки общепринятым рекомендациям, игнорирующим эту особенность, может оказаться целесообразным диверсифицировать поисковые исследования, одновременно начиная поиск «прорывных» решений в нескольких направлениях. Даже если каждый поисковый проект в отдельности имеет мало шансов увенчаться успехом, ожидаемое время достижения желаемого результата хотя бы в одном проекте может снижаться с ростом их числа. Для иллюстрации этого эффекта можно предложить следующую упрощенную модель. Предположим, фирма запустила n поисковых проектов, нацеленных на достижение

«прорывного» превосходства новой продукции над старой. Обозначим τ среднее время достижения успеха (т. е. целевого «прорывного» уровня характеристик перспективной продукции) в единичном поисковом проекте. Тогда можно приближенно считать, что вероятность достижения успеха в течение года равна $1/\tau$, вероятность недостижения успеха — $(1 - 1/\tau)$. Если реализуемые параллельно проекты независимы друг от друга, вероятность того, что ни в одном проекте в течение года не будет достигнуто успеха, равна $(1 - 1/\tau)^n$. Соответственно, вероятность успеха хотя бы одного поискового проекта в течение года равна $[1 - (1 - 1/\tau)^n]$. Естественно, если хотя бы в одном проекте удастся достичь целевого уровня характеристик, вся программа НИР считается успешно завершённой. Таким образом, можно оценить вероятность достижения успеха поисковых НИР ровно через $T_{\text{НИР}}$ лет:

$$P\{T_{\text{НИР}}\} = [1 - (1 - 1/\tau)^n](1 - 1/\tau)^{n(T_{\text{НИР}} - 1)}, \quad (1)$$

поскольку данное событие является сочетанием следующих событий:

- в течение $(T_{\text{НИР}} - 1)$ лет ни в одном поисковом проекте не удается достичь успеха;
- в году $T_{\text{НИР}}$ успех достигается хотя бы в одном проекте.

Зная вероятности достижения успеха поисковых НИР в различные сроки (например, определяя их по формуле (1)), можно оценить ожидаемую продолжительность этапа НИР:

$$\bar{T}_{\text{НИР}} = \sum_{T=1}^{+\infty} TP\{T\} = \frac{1}{1 - (1 - 1/\tau)^n}. \quad (2)$$

Она обратно пропорциональна вероятности достижения успеха в течение года хотя бы в одном проекте. С ростом числа одновременно реализуемых проектов НИР ожидаемый срок достижения

успеха сокращается: $\frac{\partial \bar{T}_{\text{НИР}}}{\partial n} < 0$.

Однако увеличение числа направлений НИР требует увеличения затрат. Следует подчеркнуть, что диверсификация поисковых исследований ни в коем случае не подразумевает распыления средств, достаточных для проведения лишь одного полноценного исследования. Такая политика (к сожалению, проводившаяся во многих наукоемких отраслях российской промышленности в 1990-е гг.) в принципе не может быть успешной, и ведет лишь к неэффективному использованию ограниченных средств. Напротив, каждый поисковый проект должен финансироваться в полном объеме до тех пор, пока хотя бы одно из направлений поиска не

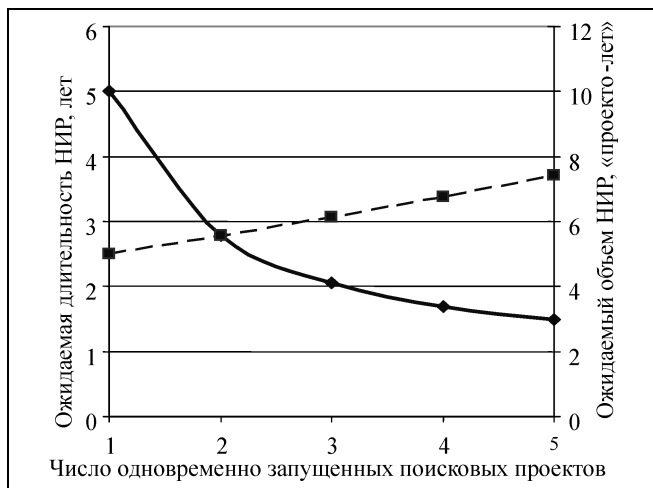


Рис. 1. Влияние диверсификации поисковых исследований на ожидаемую длительность и стоимость НИР:
—◆— — ожидаемое время завершения НИР; —■— — ожидаемый объем НИР

приведет к успеху. Естественно, при этом ожидаемый объем финансирования поисковых НИР увеличивается с ростом числа направлений поиска, но относительно медленно, поскольку сокращается ожидаемая продолжительность поиска. Обозначим $c_{\text{проект}}$ среднегодовой объем финансирования, необходимый для полноценного продолжения одного поискового исследовательского проекта. Тогда ожидаемые затраты на поисковые НИР можно оценить, учитывая формулу (2), следующим образом:

$$\bar{C}_{\text{НИР}} = c_{\text{проект}} n \bar{T}_{\text{НИР}}(n) = \frac{c_{\text{проект}} n}{1 - (1 - 1/\tau)^n}, \quad (3)$$

где произведение $n \bar{T}_{\text{НИР}}$ имеет смысл объема НИР в «проект-годах». Поскольку знаменатель полученной дроби монотонно возрастает с ростом n , ожидаемые затраты увеличиваются медленнее, чем число одновременно реализуемых проектов.

На рис. 1 рассмотрен следующий пример: $\tau = 5$ лет, т. е. каждое направление поисковых исследований с вероятностью 0,2 приведет к успеху в течение года, а с вероятностью 0,8 — не приведет. Если исследования вести в единственном направлении, ожидаемый срок достижения результата составит 5 лет; если вести поиск одновременно в двух направлениях, этот срок сократится приблизительно до 2,8 лет, и т. д., см. формулу (2). Что касается затрат на НИР, то они, как и было обосновано выше, возрастают медленнее, чем число поисковых проектов: если реализуется единственный проект, ожидаемый объем затрат соответствует 5 «проект-годам», при двух проектах он возрастет приблизительно до $2 \cdot 2,8 = 5,6$ «проект-лет», и т. д., согласно формуле (3).

Достижение успеха исследовательского проекта может быть до определенной степени форсировано за счет дополнительного финансирования [6]

(т. е. $\frac{\partial \tau}{\partial c_{\text{проект}}} < 0$). Пользуясь предложенной моде-

лью, можно оценить, что выгоднее — форсирование НИР или их диверсификация. Рассмотрим две альтернативы: вести поисковые исследования в n направлениях, каждое из которых обещает успех в среднем через τ лет, либо ограничиться единственным направлением поиска, но сократить ожидаемый срок достижения результата в n раз за счет дополнительного финансирования. Согласно формуле (2) в первом случае ожидаемая длительность этапа поисковых НИР составит

$$\begin{aligned} \bar{T}_{\text{НИР}}|_{\tau; n} &= \frac{1}{1 - (1 - 1/\tau)^n} = \\ &= \frac{1}{[1 - (1 - 1/\tau)] \sum_{i=1}^n (1 - 1/\tau)^{i-1}} = \frac{\tau}{\sum_{i=1}^n (1 - 1/\tau)^{i-1}}, \end{aligned}$$

$\tau > 1,$

а во втором —

$$\bar{T}_{\text{НИР}}|_{\tau/n; 1} = \frac{1}{1 - (1 - 1/\tau)} = \frac{\tau}{n}.$$

Поскольку при $\tau > 1$, $(1 - 1/\tau) < 1$, $\Rightarrow \sum_{i=1}^n (1 - 1/\tau)^{i-1} < n$, и $\bar{T}_{\text{НИР}}|_{\tau/n; 1} < \bar{T}_{\text{НИР}}|_{\tau; n}$, т. е. ожидаемая длительность НИР при форсировании заведомо ниже, чем при диверсификации. Однако в реальности увеличение финансирования редко приводит к пропорциональному сокращению ожидаемого срока получения результата. Как правило, вложения в форсирование работ (в том числе НИОКР) характеризуются убывающей предельной отдачей. Если сокращение в n раз ожидаемого срока достижения успеха в одном проекте потребует увеличения ежегодного финансирования проекта в $x > n$ раз, ожидаемые затраты на диверсифицированные НИР составят

$$\begin{aligned} \bar{C}_{\text{НИР}}|_{\tau; n} &= n c_{\text{проект}} \bar{T}_{\text{НИР}}|_{\tau; n} = \\ &= n c_{\text{проект}} \frac{\tau}{\sum_{i=1}^n (1 - 1/\tau)^{i-1}}, \end{aligned}$$

а на форсированные —

$$\bar{C}_{\text{НИР}}|_{\tau/n; 1} = x c_{\text{проект}} \bar{T}_{\text{НИР}}|_{\tau/n; 1} = x c_{\text{проект}} \frac{\tau}{n},$$



и $\bar{C}_{\text{НИР}}|_{\tau; n} < \bar{C}_{\text{НИР}}|_{\tau/n; 1}$ (т. е. диверсификация поисковых исследований приведет к сокращению ожидаемой стоимости НИР) при $x > \frac{n}{\sum_{i=1}^n (1 - 1/\tau)^{i-1}}$.

Также важно учесть, что при диверсификации сокращается риск увеличения длительности НИР сверх ожидаемых значений, и, как следствие, — риск запаздывания выхода на рынок относительно конкурентов.

Разумеется, предлагаемая модель носит чрезвычайно упрощенный характер. В реальности распределение срока достижения успеха проекта может быть существенно сложнее, чем предполагаемый здесь пуассоновский поток⁵ с интенсивностью $1/\tau$. Вообще, как известно специалистам в сфере менеджмента исследований и разработок [1, 4, 6], реализация НИР сопровождается множеством сложнейших и не всегда формализуемых эффектов. Например, вопреки принятым в модели предположениям, параллельно реализуемые исследовательские проекты могут оказывать друг на друга влияние (даже при независимом финансировании) посредством общения различных групп исследователей, взаимобмена плодотворными (или ошибочными) идеями и т. п. Поисковые проекты могут запускаться не одновременно, а по мере появления новых перспективных идей (в том числе, в ходе разработки уже начатых направлений). Тем не менее, по мнению авторов, данная модель на качественном уровне адекватно отражает возможный эффект диверсификации направлений поисковых НИР. При этом она допускает уточнение путем использования более адекватных законов распределения времени достижения успеха (в том числе, построенных на основе реальных статистических данных), учета взаимосвязей между отдельными параметрами и т. п.

3. МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ КОЛИЧЕСТВА НАПРАВЛЕНИЙ ПОИСКОВЫХ НИР

Можно найти оптимальный уровень диверсификации поисковых НИР, при котором повышение ожидаемых затрат на поисковые исследования оправдано выигрышем в описанной выше времен-

⁵ В то же время, из теории случайных процессов известно, что если поток случайных событий (в данном случае — поток успехов диверсифицированных НИР) является суммой многих потоков случайных событий с произвольными законами распределения, его закон распределения с ростом числа суммируемых потоков (т. е. в терминах модели — если число проектов будет увеличиваться) асимптотически приближается к пуассоновскому.

ной конкуренции. Для этого предлагается следующая модель. Временную конкуренцию двух производителей — A и B — можно представить как биматричную игру, в которой стратегиями игроков являются количества запущенных ими поисковых проектов n^A и n^B , а целевыми функциями — ожидаемые значения прибыли за весь жизненный цикл изделий⁶ (ЖЦИ) длительностью $T_{\text{жци}}$. Можно считать, что по истечении времени $T_{\text{жци}}$ создаваемое сейчас поколение изделий морально устареет, и на смену ему придет принципиально новое поколение. Важно подчеркнуть, что некорректно вычислять ожидаемые значения объемов продаж, выручки, затрат и прибыли каждого игрока на основе ожидаемой продолжительности НИР и ожидаемого срока выхода на рынок. Поскольку успех поисковых НИР достигается в случайный момент времени, вполне возможна такая ситуация, когда игрок, запустивший меньшее число поисковых проектов, чем его соперник, тем не менее, раньше достигнет успеха. Поэтому предлагается оценивать ожидаемые значения прибыли фирм по следующему алгоритму.

1. Вычислим вероятность того, что фирма A выйдет на рынок в момент T^A , а фирма B — в момент T^B , по следующей формуле:

$$P\{T^A, T^B\} = \begin{cases} 0, T^A < T_{\text{ОКР}}^A + T_{\text{ТПП}}^A + 1, \text{ или} \\ T^B < T_{\text{ОКР}}^B + T_{\text{ТПП}}^B + 1, \\ P\{T_{\text{НИР}}^A = T^A - T_{\text{ОКР}}^A - T_{\text{ТПП}}^A\} \times \\ \times P\{T_{\text{НИР}}^B = T^B - T_{\text{ОКР}}^B - T_{\text{ТПП}}^B\}, \end{cases} \quad (4)$$

где $T_{\text{ОКР}}^A$ и $T_{\text{ОКР}}^B$ — продолжительности ОКР на фирмах A и B ; $T_{\text{ТПП}}^A$ и $T_{\text{ТПП}}^B$ — продолжительности технологической подготовки производства на фирмах A и B вероятности $P\{T_{\text{НИР}}^A\}$, $P\{T_{\text{НИР}}^B\}$ оцениваются по формуле (1) и, соответственно, зависят от числа поисковых проектов, начатых фирмами A и B , n^A и n^B .

2. Оценим, пользуясь какими-либо детерминированными моделями (не рассматриваемыми в данной работе), значения объемов продаж, выруч-

⁶ В силу большой длительности ЖЦИ в наукоемких отраслях необходимо учитывать временную стоимость денег. Поэтому в практических расчетах более корректно использовать вместо прибыли чистую текущую стоимость (NPV, Net Present Value) портфеля проектов фирмы.

ки, затрат, и, в конечном счете — прибыли каждой фирмы в том случае, если фирма A выйдет на рынок в момент T^A , а фирма B — в момент T^B : $\{P^A(T^A; T^B)\}$, $\{P^B(T^A; T^B)\}$, $(T^A, T^B) = 1, \dots, T_{\text{жци}}$. Если прибыль какой-либо фирмы при данных значениях (T^A, T^B) окажется отрицательной, проявится описанный ранее эффект блокировки, и в реальности данная фирма вообще не будет выходить на рынок. В этом случае необходимо скорректировать результаты расчета для обеих фирм с учетом того, что аутсайдер вообще не выйдет на рынок и, таким образом, не составит конкуренции лидеру. Для корректного учета эффекта блокировки в предлагаемой игровой модели необходимо предусмотреть:

— прекращение любой потенциально убыточной программы либо ее продолжение в том случае, если это позволяет минимизировать убытки;

— принятие решения о прекращении или продолжении программы в момент вывода лидером продукта на рынок либо в момент окончания НИР фирмой-лидером (информацию об этом может обеспечить конкурентная разведка, подробнее см., например, работу [6]).

3. Оценим, учитывая формулу (4), ожидаемые значения прибыли конкурирующих фирм по следующим формулам:

$$\bar{P}^A = \sum_{T^A=1}^{T_{\text{жци}}} \sum_{T^B=1}^{T_{\text{жци}}} P^A(T^A; T^B) P\{T^A; T^B\};$$

$$\bar{P}^B = \sum_{T^A=1}^{T_{\text{жци}}} \sum_{T^B=1}^{T_{\text{жци}}} P^B(T^A; T^B) P\{T^A; T^B\},$$

где значения $\{P^A(T^A; T^B)\}$, $\{P^B(T^A; T^B)\}$ для $T^A, T^B = 1, \dots, T_{\text{жци}}$ определяются в п. 2. Далее можно составить платежные матрицы игроков, состоящие из элементов $\|\bar{P}_{ij}^A\|$ и $\|\bar{P}_{ij}^B\|$, где номер строки соответствует числу поисковых проектов, запущенных фирмой A , а номер столбца — числу направлений НИР фирмы B : $i = n^A, j = n^B$. Равновесием Нэша в описанной биматричной игре является такое сочетание стратегий (n^A, n^B) , от которого никому не выгодно отклоняться в одностороннем порядке.

Поскольку расчеты по предлагаемым моделям предполагают большой объем вычислений, они были автоматизированы с помощью программы в среде MATLAB. Рассмотрим следующий пример, параметры которого по порядку величины соответствуют реальной временной конкуренции на

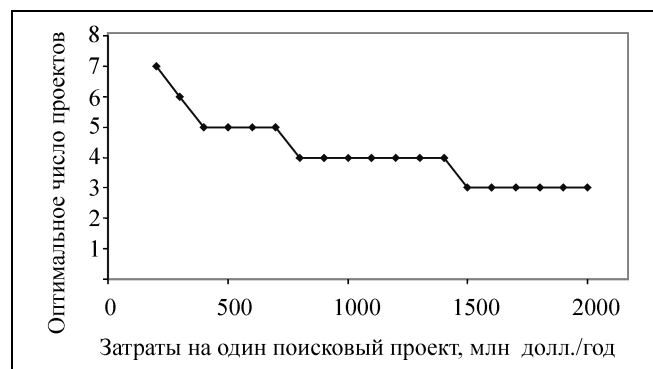


Рис. 2. Влияние стоимости финансирования поискового проекта на равновесные стратегии конкурентов

рынке магистральных пассажирских самолетов. Пусть общая продолжительность ЖЦИ данного поколения изделий составляет 20 лет; цена на монопольном рынке — 120 млн долл./ед., на конкурентном — 100 млн долл./ед. Объемы продаж составляют соответственно 250 и 300 ед./год, причем, в период конкуренции обе фирмы займут по 50 % рынка. У обеих фирм детерминированная продолжительность ОКР и ТПП равна 5 годам, а постоянные затраты на ОКР и ТПП равны 4 млрд долл. Удельные материальные затраты составляют 50 млн долл./ед., а стоимостные трудозатраты на первый экземпляр равны 100 млн долл. и сокращаются на 15 % при каждом удвоении накопленного выпуска. Будем считать, что фирмы прекращают убыточные проекты, узнавая об успехе конкурента в момент выхода его продукта на рынок.

Поскольку параметры функций затрат обоих игроков одинаковы, равновесие Нэша будет симметричным: $n_*^A = n_*^B = n_*$, $\bar{P}_*^A = \bar{P}_*^B = \bar{P}_*$. Рассмотрим влияние некоторых параметров модели на равновесное число направлений поиска и равновесные значения выигрыша. На рис. 2 изображена зависимость равновесного числа направлений поиска n_* от потребного среднегодового объема финансирования одного проекта $c_{\text{проект}}$. Среднее время достижения успеха в одном проекте τ принято равным 3 годам.

Естественно, чем дешевле обходятся поисковые исследования, тем больше направлений поиска целесообразно реализовать одновременно.

На рис. 3 и 4 изображены зависимости равновесного числа направлений поиска n_* и равновесной прибыли $\bar{P}_*$ от ожидаемого времени достижения успеха в одном проекте τ . Потребный объем финансирования одного проекта $c_{\text{проект}}$ принят равным 500 млн долл./год. Все остальные исходные данные соответствуют предыдущему примеру.

Видно, что возможность диверсификации НИР существенно смягчает последствия увеличения ожидаемого времени достижения успеха — при симметричных стратегиях обеих фирм, их прибыли (маркированная линия) почти не убывают с ростом τ . Для сравнения на рис. 4 приведены значения прибыли игроков в том случае, если фирма A реализует единственный поисковый проект (штриховая линия), а ее конкурент, компания B , диверсифицирует поисковые НИР оптимальным образом (сплошная линия). Игрок, проводящий поиск в нескольких направлениях, существенно выигрывает, причем, вначале его прибыль может даже возрастать с ростом ожидаемого времени достижения успеха проекта. Причина такого немонотонного изменения прибыли лидера состоит в том, что сначала выигрыш во временной конкуренции оказывается существеннее ухудшения общих условий работы (т. е. роста τ).

Приведем еще два примера возможного применения предлагаемого модельного подхода.

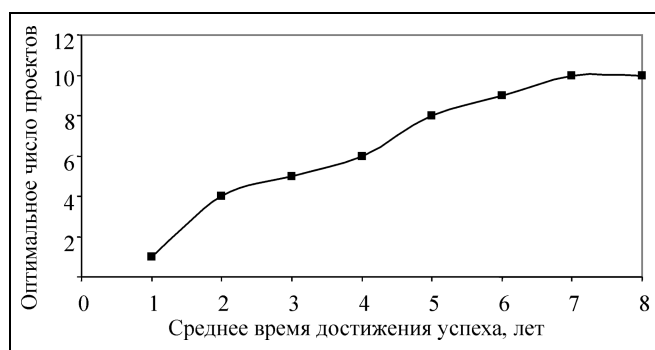


Рис. 3. Влияние среднего времени достижения успеха поискового проекта на равновесные стратегии конкурентов

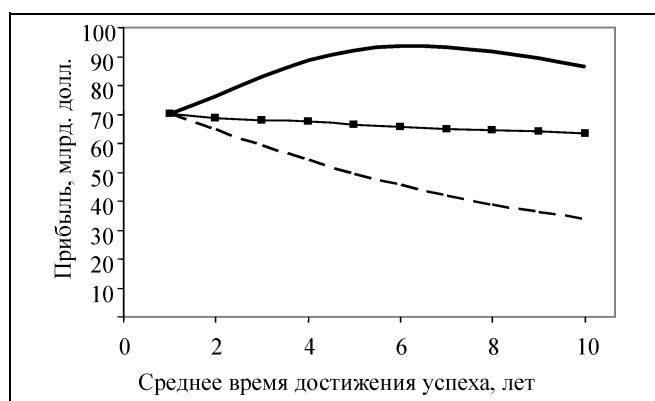


Рис. 4. Влияние среднего времени достижения успеха поискового проекта на равновесные выигрыши конкурентов: —■— — симметричные стратегии фирм A и B ; — — — не диверсифицированная стратегия фирмы A ; — — — диверсифицированная стратегия фирмы B

Внедрение новых исследовательских методов и технологий (прежде всего, информационных технологий, компьютерного моделирования вместо натурного эксперимента и т. п.) может привести к сокращению характерного срока достижения успеха τ . Среднегодовая стоимость финансирования каждого поискового проекта $c_{\text{проект}}$ при этом может как сократиться, так и возрасти. Предлагаемые модели позволяют оценить, оправдано ли возможное удорожание НИР выигрышем во временной конкуренции.

Конкурентная разведка позволяет, по меньшей мере, узнать, во скольких направлениях ведется поиск на фирмах-конкурентах, а также об успехах или неудачах этих программ⁷. Благодаря этому фирма может осознать свой проигрыш во временной конкуренции, не дожидаясь выхода продукции лидера на рынок и, таким образом, избежать потерь на продолжение бесперспективной программы. Таким образом, эффективность конкурентной разведки можно оценить, сравнивая равновесный выигрыш в двух случаях: если фирма узнаёт об успехе исследований конкурентов непосредственно по достижении ими этого успеха или только после выхода инновационной продукции на рынок.

Необходимо признать, что практическое применение предлагаемого подхода для вычисления оптимального числа направлений поисковых НИР ограничено и не только потому, что сложно оценить истинный закон распределения сроков достижения успеха. Оптимальный (согласно предлагаемой упрощенной модели) уровень диверсификации поисковых НИР может быть на практике недостижим. Строго говоря, числа направлений поиска n^A и n^B (и, соответственно, размерности платежных матриц) ограничены сверху не только по соображениям дороговизны НИР, но и отсутствием в реальности большого числа возможных независимых направлений поиска (как правило, их не более 2—5), а также — что, возможно, наиболее критично — дефицитом квалифицированных исследователей, способных вести соответствующие поисковые разработки. Важно подчеркнуть, что во многих наукоемких отраслях этот дефицит наблюдается в глобальном масштабе и не может быть преодолен за короткое время никаким увеличением текущего финансирования. Если оптимальное, согласно предложенной модели, число направлений поиска превышает реально возможное, обоснована рекомендация вести поисковые исследования, по возможности, во многих направлениях, а в стратегической перспективе — наращивать исследовательский потенциал компании, инвестируя в подготовку необходимых специалистов.

⁷ Возможность непосредственного использования результатов НИР конкурентов здесь не рассматривается и, как правило, выходит за рамки закона, хотя в реальности промышленный шпионаж, бесспорно, применяется в наукоемких отраслях чрезвычайно активно.

4. АНАЛИЗ РИСКА ПЕРЕРАСХОДА СРЕДСТВ НА НИОКР

Необходимо учитывать, что достижение успеха поисковых НИР носит принципиально случайный характер. Поэтому, пользуясь описанными моделями, можно оценить лишь ожидаемый срок окончания поисковых исследований и ожидаемые затраты. Всегда существует риск отклонения этих величин от ожидаемых значений. Также сложно прогнозировать затраты на доводку революционных технологий, потребные для массового и безопасного внедрения этих технологий в хозяйственную практику. Нельзя не согласиться с автором работы [4] в том, что высокотехнологичные инновационные проекты представляют собой сложные саморазвивающиеся системы, развитие которых не поддается детальному планированию на начальных стадиях ЖЦИ. Таким образом, неопределенность затрат на НИОКР, потребных для достижения «прорывного» превосходства новой технологии над нынешними, может быть чрезвычайно велика. В мировой практике реализации «прорывных» наукоемких проектов встречаются примеры перерасхода средств на НИОКР на десятки процентов и даже в несколько раз [4]. Однако эти затраты относятся к постоянным, и при массовом применении новой технологии распределятся на большие объемы продукции. Тогда их вклад в среднюю себестоимость единицы продукции, называемый *средними постоянными затратами*, окажется относительно невелик. Соответственно, риск даже многократного изменения этих затрат не будет существенно влиять на успешность проекта. Важнее достичь гарантированного и значительного, «прорывного» снижения средних переменных затрат (т. е. применительно к изделиям с длительным жизненным циклом — эксплуатационных затрат), поскольку оно, в первую очередь, и определяет возможность массового распространения новой технологии. Также, как было показано, критически важно не допустить, чтобы запаздывание относительно конкурентов превысило критический порог, за которым наступает эффект блокировки [8] и срыв реализации проекта. Возможно, это потребует дополнительных затрат на форсирование НИОКР и ТПП.

Рассмотрим следующий реалистичный пример (рис. 5). В настоящее время важнейшая составляющая эксплуатационных затрат авиакомпаний состоит в затратах на авиатопливо. Современные дальнемагистральные пассажирские самолеты обеспечивают удельный расход топлива в расчете на пассажира-километр на уровне 25 г/пасс.-км, что при цене авиатоплива порядка 1000 долл./т обеспечивает удельные затраты на авиатопливо на уровне 0,025 долл./пасс.-км. Пусть

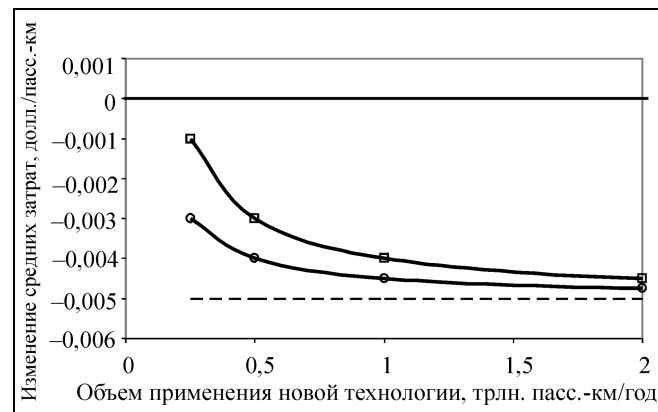


Рис. 5. Влияние риска изменения постоянных затрат на эффективность инновационной технологии:

—○— — общие средние затраты (ожидаемый уровень); —□— — общие средние затраты (пессимистический сценарий); — — — средние переменные затраты (прогноз); — — — — исходный уровень средних затрат

предлагается новое технологическое решение, позволяющее сократить удельный расход топлива на дальних маршрутах на 20 % относительно текущего уровня. Однако возможные затраты на доводку новой технологии (в том числе показателей безопасности) до уровня, позволяющего сертифицировать ее для пассажирских перевозок, в настоящее время чрезвычайно неопределенные. Возможно, они составят 10 млрд долл., но в пессимистическом варианте может потребоваться до 20 млрд, т. е. возможный прирост затрат на НИОКР составляет 100 %. Разумеется, разница в 10 млрд долл. чрезвычайно высока, однако так ли она существенна в смысле экономической эффективности новой технологии? Если на дальних маршрутах выполняется около 25 % всего пассажирооборота мировой гражданской авиации, составляющего в настоящее время около 4 трлн пасс.-км в год, новая технология потенциально может применяться в объеме 1 трлн пасс.-км в год (без учета возможного роста пассажирооборота в будущем). Если длительность жизненного цикла новой технологии равна хотя бы 20 годам (что примерно соответствует длительности жизненного цикла поколения гражданской авиатехники), средние постоянные затраты, вызванные внедрением новой технологии, составят:

- в оптимистическом сценарии — 0,0005 долл./пасс.-км;
- в пессимистическом сценарии — 0,001 долл./пасс.-км.

Однако ожидаемое сокращение удельных топливных затрат составляет, при нынешней цене авиатоплива, 0,005 долл./пасс.-км, что на порядок выше возможного прироста средних постоянных затрат.

Таким образом, предпочтительнее добиться — даже ценой удвоения затрат на НИОКР — того, чтобы удельный расход топлива действительно сократился на 20 %, чем, например, достичь 15 %-го снижения расхода, затратив ровно 10 млрд. долл. Риск недостижения целевого уровня характеристик перспективной продукции (в данном случае, эксплуатационных затрат) гораздо



существенное риска перерасхода средств на НИОКР. Принятие этого положения требует коренных изменений в менталитете инвесторов и менеджеров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Потребность российской наукоёмкой промышленности в высокорисковых инновационных разработках обусловлена жесткой глобальной конкуренцией, требующей достижения «прорывного» превосходства над зарубежными конкурентами.

На рынках наукоёмкой продукции наиболее существенны не риски перерасхода средств, а риски недостижения целевого уровня характеристик перспективной продукции и запаздывания ее выхода на рынок относительно конкурентов. Последний вид рисков можно сократить путем диверсификации поисковых НИР. Для снижения рисков запаздывания и ожидаемой стоимости НИР диверсификация может оказаться эффективнее, чем форсирование НИР путем увеличения объемов финансирования.

Оптимальное число направлений поисковых НИР возрастает по мере увеличения ожидаемой длительности достижения успеха поискового проекта и снижения затрат на финансирование проекта. При увеличении ожидаемой длительности достижения успеха поискового проекта диверсификация направлений поиска позволяет существенно сократить потери прибыли фирмы, вызванные проигрышем во временной конкуренции.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Инновационный менеджмент в России: вопросы стратегического управления и научно-технологической безопасности* / Рук. авт. колл.: В.Л. Макаров, А.Е. Варшавский. — М.: Наука, 2004. — 880 с.
2. *Тренев Н.Н.* Предприятие и его структура: анализ, диагностика, оздоровление. — М.: Приор, 2002. — 240 с.
3. *Клочков В.В., Шкадова А.А., Ждановский А.В.* Экономические аспекты морального устаревания техники // *Технология машиностроения*. — 2008. — № 11. — С. 65—70.
4. *Баринов А.Э.* Системные и политические факторы удорожания крупных инвестиционных проектов в мировой экономике // *Проблемы прогнозирования*. — 2007. — № 6. — С. 132—144.
5. *Качалов Р.М.* Управление хозяйственным риском. — М.: Наука, 2002. — 192 с.
6. *Гольдштейн Г.Я.* Стратегический инновационный менеджмент. — Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. — 267 с.
7. *Alchian A.* Reliability of Progress Curves in Airframe Production // *Econometrica*. — 1963. — Vol. 31, N 4. — P. 679—694.
8. *Arthur Brian W.* Competing Technologies, Increasing Returns and Lock-in by Historical Events // *Economic Journal*. — 1989. — N 99. — P. 116—131.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Р.М. Нижегородцевым.

Иванова Наталья Викторовна — студентка, ГОУ ВПО «Московский физико-технический институт (Государственный университет)», ✉ nata39013@gmail.com,

Клочков Владислав Валерьевич — д-р экон. наук, вед. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ☎ (495) 334-79-00, ✉ vlad_klochkov@mail.ru.



2-я Российская конференция с международным участием «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения» (УКИ-10)

18—20 октября 2010 г.,

Москва, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

Тематика конференции:

- теория, методы исследования и проектирования, опыт применения технических средств (от датчиков до исполнительных механизмов), основанных на различных физических и схемотехнических принципах;
- теория, алгоритмы и программное обеспечение систем УКИ;
- анализ состояния, тенденций и перспектив развития систем УКИ;
- дискретно-событийные модели в системах УКИ, включая сетцентрические, логические, на основе размытой логики, сети Петри и др.;
- создание средств систем УКИ на основе новых технологий (микро- и нано-электромеханических и оптоэлектромеханических систем, биомикросистем, беспроводной связи и др.);
- компьютерное и физическое моделирование технических и программных средств систем УКИ;
- многопроцессорные и многомашинные системы как средства систем УКИ, их структуры, отказоустойчивость, диагностируемость;
- теоретические и прикладные аспекты повышения и оценивания качества средств систем УКИ (точности, быстродействия, надежности, отказоустойчивости; живучести, диагностируемости, интеллектуальности и т. д.), метрологическое обеспечение создания и применения средств УКИ, их испытания и сертификация;
- методы проектирования технических и программных средств систем УКИ для работы в экстремальных условиях и применения в специфических областях (атомная энергетика, оборона, космос, транспорт, медицина, горнодобывающая промышленность, окружающая среда и др.);
- исследования и разработка технических и программных средств встроенных, сетевых, проблемно-ориентированных систем УКИ;
- вопросы обучения в области средств УКИ.

URL: <http://cmm.ipu.ru>, ✉ cmm-conf@mail.ru, ☎ (495) 334-93-70.

ВЫЧИСЛЕНИЕ ОХВАТА СМИ

Е.В. Попов, Г.А. Шматов

Развит аналитический аппарат теории вычисления охвата СМИ. Получено рекуррентное соотношение для спектра охвата, дан анализ поведения частотного распределения охвата, обобщена формула вычисления охвата СМИ и дана оценка погрешности вычисления охвата. Отмечено, что развитый аналитический аппарат позволяет решать задачи управления рекламным бюджетом и оптимизации размещения рекламы в СМИ.

Ключевые слова: охват СМИ, частотное распределение охвата, погрешность вычисления охвата, оптимизация.

ВВЕДЕНИЕ

В статье [1] изложены основы теории медиапланирования, выведены формулы вычисления полного охвата аудитории, распределения охвата по числу контактов, а также формула вычисления эффективного охвата. Все эти медиапараметры используются при решении задач оптимизации размещения рекламы и управления объемом рекламного бюджета. Путем оптимального размещения рекламы достигается минимизация рекламного бюджета или максимизация эффекта рекламного воздействия в зависимости от выбранного критерия оптимизации. Задачи оптимизации размещения рекламы решаются после того, как решены задачи стратегического и тактического планирования рекламной кампании (подробнее см. статью [1] и приведенную в ней литературу).

Для количественной оптимизации размещения рекламы необходим аналитический аппарат, на основе которого разрабатываются алгоритмы, позволяющие учитывать те или иные критерии эффективности оптимизации. Цель данной статьи состоит в дальнейшем развитии аналитического аппарата количественной теории медиапланирования, основы которой изложены в статье [1]. Развитие теории и ее аналитического аппарата предполагает:

- вывод следствий из основных положений теории;
- вывод математических формул, упрощающих вычисление медиапараметров, в том числе вывод рекуррентных соотношений, оценка погрешности вычислений и т. п.;

- анализ зависимости охвата и его спектра от параметров СМИ, что представляет интерес для практического применения результатов теории;
- введение новых параметров, расширяющих область применимости теории.

В рамках данной статьи аналитический аппарат теории развивается в направлениях, связанных с решениями этих задач. Прежде чем переходить к изложению результатов, напомним основные определения и обозначения, введенные в статье [1] и используемые далее.

Определение 1. *Рейтинг R* издания или определенного временного интервала в сетке вещания электронных СМИ — это доля целевой аудитории, состоящая из людей, имевших контакт с *одним* выходом издания или с *этим* временным интервалом.

Определение 2. *Предельный охват G^∞* издания или временного интервала — это доля целевой аудитории, состоящая из людей, имевших хотя бы один контакт со СМИ при сколь угодно *большом* числе выходов издания или однотипных временных интервалов для электронных СМИ.

Определение 3. *Охват $G(m)$* — это доля целевой аудитории, состоящая из людей, имевших хотя бы *один* контакт за m выходов одного СМИ (m — число выходов СМИ, число размещений рекламы в СМИ).

Определение 4. *Частотное распределение (спектр) охвата* — это функция $g(f)$, с помощью которой полный охват $G(m)$ представляется в виде

суммы охватов $G(m) = \sum_{f=1}^m g(f)$ с частотами контактов, изменяющимися в пределах $1 \leq f \leq m$.



1. РЕКУРРЕНТНОЕ СООТНОШЕНИЕ ДЛЯ СПЕКТРА ОХВАТА

Спектры охватов СМИ можно вычислять непосредственно по формуле (12) работы [1]:

$$g(f) = G^{\infty} C_m^f r^f q^{m-f}, \quad (1)$$

где $C_m^f = m!/f!(m-f)!$ — биномиальный коэффициент, $r = R/G^{\infty}$, $q = 1 - r$. Кроме того, спектры охватов можно вычислить с помощью рекуррентного соотношения, которое легко получить из этой формулы. Оно выводится путем следующих тождественных преобразований:

$$\begin{aligned} g(f) &= G^{\infty} C_m^f r^f q^{m-f} = \\ &= G^{\infty} [(m-f+1)/f] C_m^{f-1} (r/q) r^{f-1} q^{m-f+1}, \end{aligned}$$

откуда находим

$$g(f) = [(m-f+1)r/(fq)]g(f-1). \quad (2)$$

С помощью этой формулы можно вычислить охват при любой частоте контактов f , зная охват с частотой контактов, на единицу меньше: $f-1$, т. е. формула (2) позволяет последовательно вычислять спектр охвата $g(f)$ для любого значения частоты в интервале $2 \leq f \leq m$, зная начальное значение — охват одного контакта $g(1)$. Величину $g(1)$ находим непосредственно из формулы (1):

$$g(1) = mRq^{m-1}. \quad (3)$$

Приведем пример применения полученных формул для вычисления спектра охвата.

Пример 1. Пусть СМИ, у которого рейтинг $R = 20\%$ и предельный охват $G^{\infty} = 40\%$, вышло 3 раза. Сколько процентов целевой аудитории будет иметь с этим СМИ: а) один контакт; б) два контакта; в) три контакта?

Решение. *Способ 1.* Подставив $m = 3$ в формулу (3), получим:

$$\text{а) } g(1) = 3 \cdot 0,2 \cdot (1 - 0,2/0,4)^2 = 15\%.$$

Используя формулу (1), вычисляем каждое последующее значение $g(f)$ по предыдущему:

$$\text{б) } g(2) = 15\% \cdot (2 \cdot 0,2/0,4) / [2 \cdot (1 - 0,2/0,4)] = 15\%;$$

$$\text{в) } g(3) = 15\% \cdot (0,2/0,4) / [3 \cdot (1 - 0,2/0,4)] = 5\%.$$

Способ 2. Используя формулу (1), при $m = 3$ получим:

$$\text{а) } g(1) = 0,4 \cdot 3! / (1! \cdot 2!) \cdot (0,2/0,4)^1 \cdot (1 - 0,2/0,4)^2 = 15\%;$$

$$\text{б) } g(2) = 0,4 \cdot 3! / (2! \cdot 1!) \cdot (0,2/0,4)^2 \cdot (1 - 0,2/0,4)^1 = 15\%;$$

$$\text{в) } g(3) = 0,4 \cdot 3! / (3! \cdot 0!) \cdot (0,2/0,4)^3 \cdot (1 - 0,2/0,4)^0 = 5\%.$$

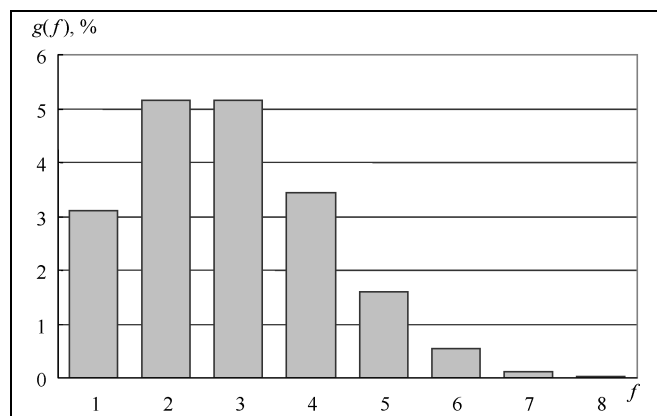


Рис. 1. Частотное распределение (спектр) охвата СМИ с рейтингом $R = 5\%$, предельным охватом $G = 20\%$; число выходов $m = 11$

Таким образом, рекуррентная формула (2) дает те же значения, что и формула (1), но с меньшим объемом промежуточных вычислений, что важно при создании численных алгоритмов вычисления медиапараметров. ♦

Проверка. Полный охват G также можно вычислить двумя способами. С одной стороны, $G = g(1) + g(2) + g(3) = 35\%$. С другой стороны, согласно формуле (13) работы [1]

$$G(m) = \sum_{f=1}^m g_m(f) = G^{\infty} [1 - (1 - R/G^{\infty})^m] \quad (4)$$

получим

$$G = 0,4 [1 - (1 - 0,2/0,4)^3] = 35\%. \quad \blacklozenge$$

Используя формулу (1) или (2), построим спектр охвата некоторого СМИ, характеризуемого определенными значениями рейтинга и предельного охвата. На рис. 1 показан спектр охвата СМИ с рейтингом $R = 5\%$ и предельным охватом $G^{\infty} = 20\%$ при условии, что число выходов этого СМИ $m = 11$. График представляет собой столбчатую диаграмму (гистограмму), которая для каждого значения f показывает долю аудитории $g(f)$, имевшую ровно f контактов со СМИ.

Как видно из рисунка, зависимость $g(f)$ при выбранных параметрах имеет максимум (в данном случае на двух соседних частотах $f = 2$ и $f = 3$). Далее для удобства восприятия графиков будем заменять такие диаграммы непрерывными кривыми, соединяющими значения спектра для каждой частоты.

2. АНАЛИЗ СПЕКТРОВ ОХВАТА

Проанализируем характер функции $g(f)$ в зависимости от параметров m , R и G^{∞} , что представляет интерес для практического использования резуль-

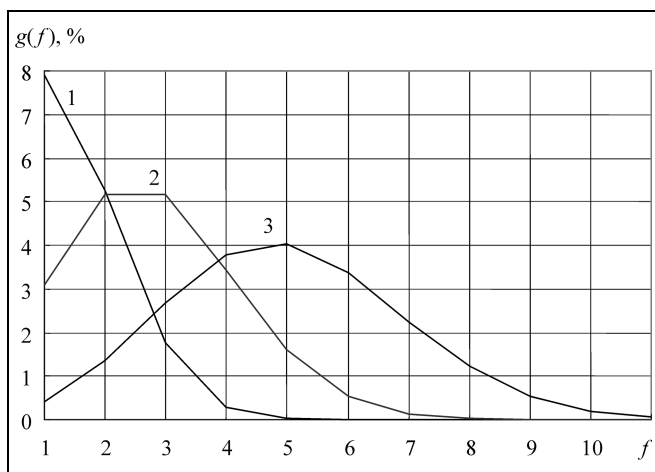


Рис. 2. Спектры охвата СМИ с $R = 5\%$, предельным охватом $G^\infty = 20\%$:
1 — $m = 5$; 2 — $m = 11$; 3 — $m = 20$

татов теории. На рис. 2 показано три спектра $g(f)$ одного и того же СМИ. Спектры отличаются друг от друга числом выходов СМИ: $m = 5$, $m = 15$ и $m = 30$. Рейтинг и предельный охват — те же, что и на рис. 1.

Видно, что с увеличением числа выходов максимум кривой $g(f)$ всегда уменьшается и смещается в область больших частот, а ширина кривой увеличивается. Максимум спектра охвата соответствует определенной частоте контактов f_m , которая вычисляется по формуле

$$f_m = [(m + 1)R/G^\infty], \quad (5)$$

где квадратные скобки означают целую часть числа [2]. Если число $(m + 1)R/G^\infty$ целое, то максимальное значение спектра реализуется при *двух частотах*: f_m и $f_m - 1$ (см. рис. 1 и пример 2).

Пример 2. Пусть $R = 5\%$, $G^\infty = 20\%$ и $m = 11$. Найдём частоту, при которой реализуется максимум спектра.

Решение. Согласно формуле (5) $f_m = [12 \cdot 5/20] = 3$. Поскольку $f_m = 3$ — целое число, то частота $f_m - 1 = 2$ также соответствует максимуму спектра охвата (см. рис. 1). ♦

Отметим, что средняя частота контакта $f_{cp} = mR/G(m)$ не совпадает с частотой f_m , при которой наблюдается максимум кривой $g(f)$. Для того, чтобы убедиться в этом, достаточно сравнить соответствующие формулы. При большом числе выходов m текущий охват $G(m)$ оказывается близким к предельному G^∞ , и тогда частоты f_{cp} и f_m будут либо совпадать, либо отличаться на 1. Несовпаде-

ние частот f_{cp} и f_m является следствием асимметрии кривой $g(f)$ относительно своего максимума.

Ширина кривых $g(f)$ определяется среднеквадратичным отклонением σ случайной величины f . Нетрудно показать, что для найденного распределения вероятностей $g(f)$ среднеквадратичное отклонение вычисляется как

$$\sigma = G^\infty(mrq)^{1/2}/G(m). \quad (6)$$

Из формулы (6) следует, что при достаточно больших m среднеквадратичное отклонение увеличивается с ростом m . Это значит, что с увеличением числа выходов СМИ растёт число людей с числом контактов, сильно отличающимся от средней частоты f_{cp} .

На рис. 3 построены спектры четырех СМИ с одинаковыми предельными охватами и выходами ($G^\infty = 30\%$, $m = 16$) и разными рейтингами: $R = 5\%$; $R = 10\%$; $R = 20\%$ и $R = 25\%$. С ростом рейтинга максимум спектра смещается вправо, а значение максимума и ширина кривых могут как увеличиваться, так и уменьшаться в зависимости от отношения R/G^∞ .

На рис. 4 построены спектры охватов трех СМИ с одинаковыми рейтингами и выходами ($R = 5\%$, $m = 11$) и разными предельными охватами: $G^\infty = 10\%$, $G^\infty = 20\%$ и $G^\infty = 25\%$.

С увеличением предельного охвата максимум спектра всегда смещается в область меньших частот, что следует из формулы (5). При этом значение максимума и ширина кривых могут как уменьшаться, так и увеличиваться в зависимости от значения рейтинга и числа выходов. При выбранных

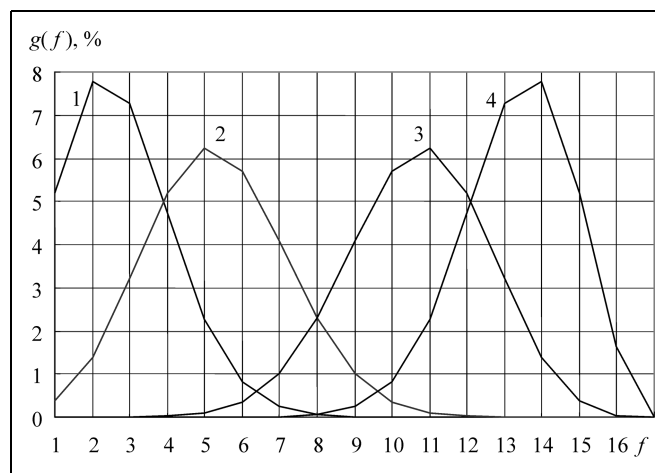


Рис. 3. Спектры охватов четырех СМИ с предельным охватом $G^\infty = 30\%$ и числом выходов $m = 16$:
1 — $R = 5\%$; 2 — $R = 10\%$; 3 — $R = 20\%$; 4 — $R = 25\%$

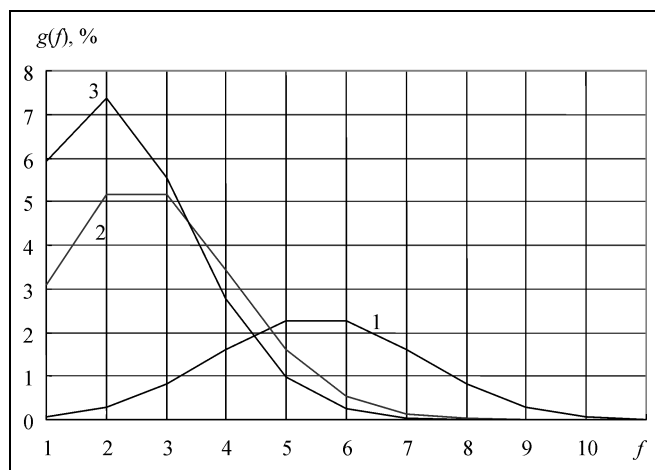


Рис. 4. Спектры охватов трех СМИ с рейтингом $R = 5\%$ и числом выходов $m = 11$:

1 — $G^\infty = 10\%$; 2 — $G^\infty = 20\%$; 3 — $G^\infty = 25\%$

для расчета параметрах максимум увеличивается, а ширина кривых уменьшается — см. рис. 4.

Из рисунков видно, что, как правило, частотные распределения охвата $g(f)$ представляют собой характерные кривые с одним максимумом. Однако зависимость $g(f)$ может быть и другой — монотонно возрастающей или монотонно убывающей в зависимости от соотношения параметров m и R/G^∞ .

Приведенные спектры охвата представляют собой, по сути, хорошо известные графики вероятностей биномиального распределения, точнее, графики модифицированного путем перенормировки биномиального распределения вероятностей, параметры которого определенным образом связаны с параметрами, характеризующими медиа (рейтинг, предельный охват, число выходов и др.). Установленная в данной теории связь медиапараметров с параметрами биномиального распределения дает возможность количественного прогнозирования эффективности использования медиа и возможность управления объемом рекламного бюджета в зависимости от той или иной коммуникационной задачи.

3. ПОГРЕШНОСТЬ ВЫЧИСЛЕНИЯ ОХВАТА

Вычисляя охват аудитории G , необходимо контролировать погрешность (ошибку) вычисления охвата ΔG . Погрешность определения охвата аудитории обусловлена погрешностями измерения рейтинга и предельного охвата, которые используются при вычислении охвата. Оценим погрешность вычисления охвата ΔG . Согласно формуле (4) охват

СМИ является функцией двух независимых переменных R и G^∞ :

$$G = G^\infty [1 - (1 - R/G^\infty)^m]. \quad (7)$$

Для определения погрешности охвата используем формулу вычисления ошибки для переменной, являющейся функцией нескольких измеряемых величин (см., например, книгу [3]):

$$\Delta G^2 = [(\partial G / \partial R) \Delta R]^2 + [(\partial G / \partial G^\infty) \Delta G^\infty]^2.$$

Вычисляя производные $\partial G / \partial R$ и $\partial G / \partial G^\infty$, получим

$$\Delta G^2 = [m(1 - R/G^\infty)^{m-1} \Delta R]^2 + \{[1 - (1 - R/G^\infty)^m - mR/G^\infty(1 - R/G^\infty)^{m-1}] \Delta G^\infty\}^2. \quad (8)$$

Видно, что ошибка вычисления охвата ΔG является функцией параметров медиа m , R и G^∞ . При $m = 1$ из формулы (9) следует, что $\Delta G = \Delta R$. Отметим, что при $m \rightarrow \infty$ выполняются следующие соотношения:

$$(1 - R/G^\infty)^m \rightarrow 0,$$

$$m(1 - R/G^\infty)^{m-1} \rightarrow 0,$$

с учетом которых из формулы (8) при $m \rightarrow \infty$ следует, что $\Delta G = \Delta G^\infty$.

Приведем пример вычисления ошибки вычисления охвата, используя формулу (8).

Пример 3. Пусть в результате измерений имеются следующие значения рейтинга R , предельного охвата СМИ G^∞ и ошибок их измерения, полученных при определенном уровне надежности измерений (уровне доверительной вероятности): $R = 10\%$, $G^\infty = 36,5\%$, $\Delta R = 2\%$ и $\Delta G^\infty = 2,7\%$.

Решение. Найдем ошибку вычисления охвата при шести выходах этого СМИ. Подставив указанные выше данные в формулу (8), получим $\Delta G = 2,8\%$. Вычислим охват G шести выходов СМИ по формуле (7):

$$G = 0,365[1 - (1 - 0,1/0,365)^6] = 31,2\%.$$

Таким образом, при том уровне надежности измерений, который задавался в процессе определения рейтинга и предельного охвата, значение охвата, достигнутого за шесть выходов СМИ, будет находиться в следующем интервале, задаваемом размером ошибки ΔG : $G = 31,2\% \pm 2,8\%$. ♦

4. ОХВАТ ПРИ НАЛИЧИИ ПОСТОЯННОЙ АУДИТОРИИ СМИ

Одно из направлений развития теории состоит в ее обобщении. Теория вычисления охвата, изло-

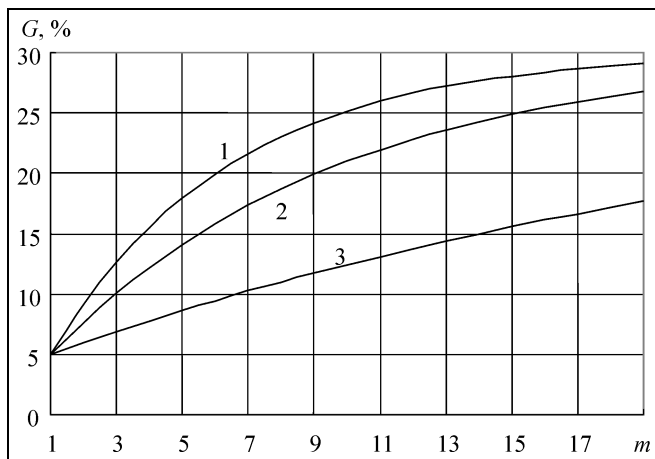


Рис. 5. Зависимость охвата от числа выходов для СМИ с $R = 5\%$, $G^\infty = 30\%$:
1 — $R_c/R = 0$; 2 — $R_c/R = 0,4$; 3 — $R_c/R = 0,8$

женная в статье [1], может быть обобщена с помощью введения дополнительных параметров, которые отражают те или иные особенности поведения охвата аудитории, наблюдаемые на практике при определенных условиях. Например, некоторые СМИ могут иметь не только накапливаемую от выхода к выходу аудиторию, но и постоянную аудиторию, которая не изменяется от выхода к выходу этих СМИ. В соответствии с этим будем считать, что одна часть аудитории СМИ постоянна, а другая ее часть контактирует со СМИ по вероятностной схеме с параметрами R_p и G_p^∞ . В этом случае формулу вычисления полного охвата (7), очевидно, нужно записать в следующем виде:

$$G(m) = R_c + G_p^\infty [1 - (1 - R_p/G_p^\infty)^m],$$

где R_c — постоянная часть аудитории СМИ. При этом рейтинг R и предельный охват G^∞ будут иметь следующие значения: $R = R_p + R_c$ и $G^\infty = G_p^\infty + R_c$. Поскольку в данном случае появился новый параметр R_c , необходимо описать его влияние на динамику накопления охвата аудитории при последовательных выходах СМИ. На рис. 5 построены зависимости охвата от числа выходов $G(m)$ для СМИ с рейтингом $R = 5\%$ и предельным охватом $G^\infty = 30\%$, но разным значением отношения R_c/R .

Кривые 1–3 на графике соответствуют разным значениям отношения величины постоянной аудитории к рейтингу R_c/R . Величина R_c/R характеризует долю, которую составляет постоянная аудитория по отношению к полной аудитории одно-

го выхода СМИ. Анализ поведения охватов $G(m)$, построенных для разных значений R_c/R , позволяет проследить влияние доли постоянной аудитории на динамику накопления охвата при последовательных выходах СМИ.

Из рис. 5 видно, что при увеличении отношения R_c/R динамика насыщения охвата существенно изменяется. А именно, с ростом доли постоянной аудитории СМИ начальная скорость изменения охвата уменьшается. Это объясняется более низким уровнем сменяемости аудитории при увеличении отношения R_c/R . Поэтому насыщение охвата аудитории для СМИ с большой долей постоянной аудитории может быть достигнуто при большем числе выходов этого СМИ по сравнению со СМИ с аналогичными параметрами R и G^∞ , но меньшей долей постоянной аудитории. Это обстоятельство важно при решении задач размещения рекламы и оптимизации рекламного бюджета.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получена формула, описывающая накопление охвата аудитории как при случайном обращении к СМИ, так и при наличии постоянной аудитории СМИ. Выполнен анализ поведения частотного распределения охвата и погрешности вычисления охвата аудитории, что важно при решении задач оптимизации размещения рекламы и управления рекламным бюджетом. Дальнейшее развитие количественной теории медиапланирования предполагает изучение особенностей динамики накопления охвата аудитории, а также вывод формул вычисления охвата и спектра охвата для случая произвольного числа СМИ, вычисления доли рекламного го- лоса, планируемой от рекламы прибыли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов Е.В., Шматов Г.А. Теория вычисления охвата СМИ // Проблемы управления. — 2009. — № 5. — С. 22–27.
2. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. — М.: Наука, — 1984. — С. 572.
3. Агекян Т.А. Основы теории ошибок. — М.: Наука, 1972. — С. 120.

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.В. Кульбой.

Попов Евгений Васильевич — д-р экон. наук, д-р физ.-мат. наук, зам. директора, Институт экономики УрО РАН, г. Екатеринбург, ☎ (343) 371-18-51, ✉ epopov@mail.ru,

Шматов Георгий Артемович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, Уральский госуниверситет им. А.М. Горького, г. Екатеринбург, ✉ sga36@mail.ru.



СИСТЕМА СТИМУЛИРОВАНИЯ ТРУДОВЫХ РЕСУРСОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ НОВОЙ ТЕХНИКИ

С.Е. Оленев

Предложена система индивидуального стимулирования труда рабочего, основанная на математической модели, отражающей рост нормы выработки в течение времени освоения изделий новой техники. Показана, что такая система способствует получению объективной оценки труда рабочего и его квалификации на данной технологической операции, что позволяет установить более тесную взаимосвязь между его заработной платой и конкретно выполненной работой.

Ключевые слова: автоматизация, моделирование, стимулирование, прогнозирование, выпуск, освоение, норма выработки.

ВВЕДЕНИЕ

Для успешной работы внутризаводских коллективов и отдельных рабочих важно обеспечить необходимую обоснованность и однородность норм, применяемых на различных производственных участках, рабочих местах и операциях.

В настоящее время качество норм предусматривается анализировать с помощью индивидуальных уровней выполнения норм отдельными исполнителями и их рассеяния относительно среднего значения этого показателя по всей анализируемой совокупности. По предельно допустимым отклонениям фактических значений выполнения норм от среднеарифметического значения выявляются места с завышенной или заниженной напряженностью применения норм. Более детальное изучение дифференциации индивидуальных уровней выполнения норм отдельными рабочими показывает наличие некоторых закономерных изменений этого показателя под влиянием ряда постоянно действующих факторов. Например, общеизвестно, что по мере роста опыта и мастерства исполнителя при одних и тех же нормах уровень их выполнения заметно повышается.

Современные приемы математической обработки статистической информации вместе с логическим анализом позволяют выявить законы рассеяния уровней норм выработки и разработать современный метод их формирования, способ-

ствующий повышению научного уровня работы заводских служб нормирования и эффективному использованию вычислительной техники при установлении обоснованных уровней выполнения норм для конкретных рабочих.

В общем случае порядок функционирования и информированность участников определяют механизм функционирования (управления) активной системы [1].

Наибольшие трудности в анализе качества норм труда представляет изучение закономерностей и процессов, определяющих рассеяние индивидуальных результатов выполнения норм отдельными исполнителями на конкретных рабочих местах при нестационарном процессе освоения выпуска новой техники. В этом случае речь идет о технологических операциях с преобладанием машинно-ручных и ручных приемов их выполнения при свободном ритме работы исполнителя, когда фактически затрачиваемое время существенно отклоняется от предусмотренного нормой. Такие условия характерны для предприятий с серийным, мелкосерийным и единичным типом производства. В связи с этим на предприятиях мелкосерийного и единичного типа уровни выполнения норм отдельными исполнителями имеют значительные различия, и для получения высокопроизводительного труда необходима соответствующая заинтересованность рабочего, которую можно создать путем стимулирования, выражающегося в материальном и моральном вознаграждении.

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ И СТИМУЛИРОВАНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ НОРМ ВЫРАБОТКИ

Для индивидуальной оценки труда необходимо прежде всего найти закономерности, объективно отражающие квалификацию и опыт исполнителя, а также его производительность.

Характер рассеяния индивидуальных показателей выполнения норм можно представить моделью, которая позволяет учесть выполнение норм выработки рабочими разной квалификации, опыт в течение определенного времени:

$$E(T) = 1 - \exp\left[\frac{\gamma}{\eta}(1 - e^{-\eta T}) - (\gamma + h)T\right], \quad (1)$$

где $E(T)$ — доля выполнения норм выработки; γ — параметр, задающий среднюю скорость роста нормы выработки; h — коэффициент, учитывающий наличие определенного профессионального навыка (опыта) у рабочего; η — параметр, корректирующий скорость роста нормы выработки.

Для нахождения значений γ , h и η необходимо иметь статистические данные (или базу данных) исследований, включающих в себя нормы выработки рабочих, занятых на различных операциях по изготовлению деталей, сборке узлов и изделий аналогичного типа. Не останавливаясь на методе нахождения параметров модели (1), построим зависимость $E(T)$ для значений $\gamma = 2, h = 1, \eta = 1,5$; $\gamma = 2, h = 0,1, \eta = 1$; $\gamma = 0,5, h = 0,1, \eta = 1$ (рис. 1).

Кривая 1 отражает плановое увеличение нормы выработки рабочим, имеющим квалификационный разряд, соответствующий заложенному в технологическом процессе для выполнения данной операции. Кривая 3 соответствует нормам выра-

ботки, которые показывает рабочий с более высоким квалификационным разрядом и выполняющим ту же операцию, а кривая 2 воспроизводит рост нормы выработки неквалифицированного рабочего. Анализ проведенных автором исследований и наблюдений двигательной деятельности рабочих, выполняющих различного рода технологические операции, показывает, что движения рабочего могут быть разделены на три стадии.

На первой стадии движений, совокупность которых позволяет выполнить новую технологическую операцию, они осознаются, происходит привыкание к незнакомому еще виду деятельности (упражнению) и условиям внешней среды, в результате чего рабочий выполняет требуемую норму выработки на 70—75 %.

На второй стадии появляются автоматизмы, сигнализирующие о появлении у рабочего определенных навыков, наблюдаются становление ведущего уровня построения движения, определение его двигательного состава и выполнение необходимых коррекций и автоматизации при переключении на более низкие уровни выполнения технологической операции. Благодаря этому требуемая норма выработки выполняется уже на 90—95 %.

На третьей стадии происходит стабилизация приобретенных навыков и их совершенствование, позволяющие выполнять установленную норму на 100 % и более.

В соответствии с этим по плану (кривая 1) ко времени, равном 1,6 (условных единиц), должна закончиться первая стадия. К указанному времени рабочий должен выполнять норму выработки на 70 %. Вторая стадия должна закончиться ко времени 2,4, а третья — ко времени 3,2, при этом рабочий должен выполнять норму выработки соответственно на 90 и 100 % (см. рис. 1).

Время каждой стадии различно и зависит от способностей индивидуума, его заинтересованности и желания достижения мастерства в выполняемой работе, а также от его опыта и профессиональной подготовки (разряда) в начале освоения новой технологической операции. Все эти факторы непосредственно влияют на скорость роста нормы выработки и на ее начальный уровень, от которого как бы отталкивается рабочий, приступая к выполнению новой для него технологической операции. Имея семейство подобных кривых, можно прогнозировать время достижения требуемых норм выработки при освоении нового изделия, а также объективно оценивать квалификацию рабочего, занятого данной операцией. Кроме того, появляется возможность управлять производительностью труда, используя индивидуальное стимулирование рабочего.

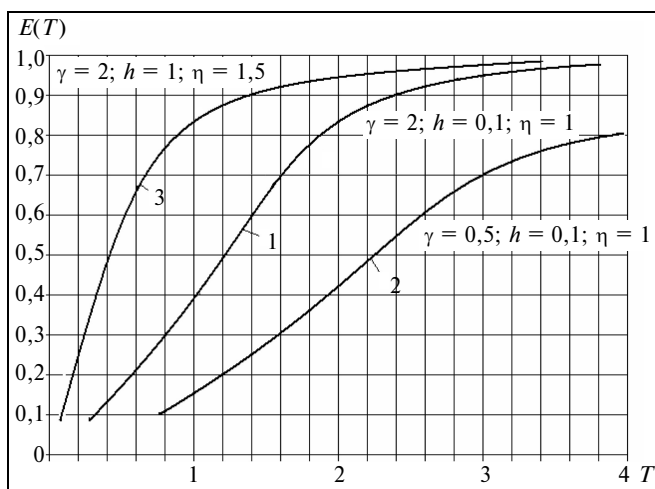


Рис. 1. Рост индивидуальных норм выработки



При выполнении новой технологической операции рабочий из-за отсутствия необходимого квалификационного навыка и опыта не может, как правило, достичь требуемого качества и нормы выработки. Отсутствие навыка будем учитывать с помощью временного планового квалификационного коэффициента (ВПКК). Так как этот коэффициент должен учитывать плановую количественную (норму выработки) и качественную стороны результатов труда рабочего, то его значение будет равно произведению двух коэффициентов, отражающих эти стороны.

Количественный коэффициент будем выражать через плановую долю нормы выработки за определенный промежуток времени. Для числового выражения качества изготавливаемой рабочим продукции приравняем коэффициент качества к коэффициенту количества, что логически вполне обоснованно. Как правило, только при полном выполнении нормы выработки, когда стабилизируются и совершенствуются приобретенные навыки, рабочий изготавливает продукцию с высоким требуемым качеством.

Таким образом, ВПКК k рабочего определяется выражением

$$k = (N_{\text{п}}(t)/N_{\text{т}})^2, \quad (2)$$

где $N_{\text{п}}(t)$ — планируемая норма выработки к данному моменту времени, $N_{\text{т}}$ — требуемая (окончательная) норма выработки, которой должен добиться рабочий.

Из выражения (2) можно определить значение $N_{\text{п}}(t)$ для рабочего, если исходить из значения k . По мере роста планового задания коэффициент k приближается к единице и становится равным ей, когда планируемая норма достигнет требуемой ($N_{\text{п}}(t) = N_{\text{т}}$).

Заработная плата рабочего-сдельщика (без зарплаты за незавершенное производство) с учетом ВПКК составит

$$Z_{\text{осн}} = kn_{\text{ф}}d, \quad (3)$$

где $Z_{\text{осн}}$ — основная заработная плата рабочего; k — временный плановый квалификационный коэффициент; $n_{\text{ф}}$ — число изделий, изготовленных рабочим фактически за временной промежуток, на котором действует данный коэффициент k ; d — расценка на изделие.

Постоянный рост коэффициента k в течение времени (см. рис. 1) будет первым стимулирующим фактором для рабочего, способствующим его заинтересованности в постоянном повышении производительности труда. Если он не будет стремиться увеличивать нормы выработки, то в после-

дующий период времени ему не удастся заработать максимально возможную сумму из-за недостаточной (по сравнению с плановой) нормы выработки, т. е. из-за более низкого значения $n_{\text{ф}}$ в формуле (3).

Так как вследствие недостаточного квалификационного навыка рабочий не сможет получить за работок, который должен бы быть у него при выполнении требуемых норм выработки, то руководству следует выплатить ему денежную компенсацию, исходя из количества недоданной рабочим продукции, т. е. в размере

$$K = (n_{\text{т}} - n_{\text{ф}})d, \text{ при } n_{\text{ф}} > n_{\text{п}}; \quad (4)$$

$$K = (n_{\text{т}} - n_{\text{п}})d, \text{ при } n_{\text{ф}} \leq n_{\text{п}}, \quad (5)$$

где K — размер денежной компенсации; $n_{\text{п}}$ — число изделий, которое необходимо производить в соответствии с планом; $n_{\text{т}}$ — число изделий, которое необходимо производить в соответствии с требуемой (окончательной) нормой выработки.

Выражения (4) и (5) обеспечивают заинтересованность рабочего в выполнении только планового задания (только запланированной на данный момент нормы выработки). Действительно, если $n_{\text{ф}} > n_{\text{п}}$, то размер денежной компенсации уменьшается по сравнению со случаем, когда $n_{\text{ф}} = n_{\text{п}}$. В результате, несмотря на то, что рабочий изготовит большее число деталей, чем по плану, денежная компенсация окажется меньше на величину

$$\Delta K = (n_{\text{ф}} - n_{\text{п}})(1 - k)d. \quad (6)$$

Чем меньше k и больше разница между фактическим числом изготовленных изделий и плановым, тем больше ΔK и меньше заработок рабочего, т. е. особенно мала денежная компенсация будет в начальный период времени. Формулу (4) целесообразно применять, например, в случаях, когда ущерб от брака велик, и получающееся в результате перевыполнения планового задания уменьшение заработка выступает в качестве сдерживающего обстоятельства, не позволяющего рабочему проявлять в действиях поспешность, которая могла бы иметь место в погоне за большим заработком. При этом снижается вероятность получения брака на начальном этапе освоения изделий новой техники.

Изготовление планового числа изделий ($n_{\text{ф}} = n_{\text{п}}$) способствует выплате денежной компенсации в полном объеме, так как согласно (6) в этом случае $\Delta K = 0$.

Если рабочий будет изготавливать меньшее число изделий, чем это планируется ($n_{\text{ф}} < n_{\text{п}}$), то заработок рабочего будет меньше, чем в случае $n_{\text{ф}} = n_{\text{п}}$, хотя размер денежной компенсации будет

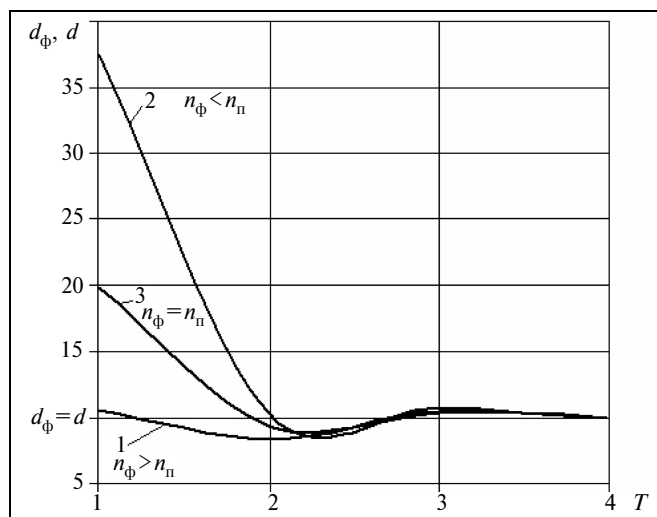


Рис. 2. Изменение фактической расценки

таким же. Снижение заработка произойдет из-за уменьшения размера заработной платы (3).

Таким образом, получается, что только изготовление планового числа изделий ($n_\phi = n_n$) на протяжении всего периода освоения нового изделия позволяет рабочему добиться максимального заработка. Это выступает вторым стимулирующим фактором, заинтересовывающим рабочего в постоянном повышении производительности труда в указанный период времени.

В соответствии с формулами (3) и (5) суммарный заработок рабочего (основная заработная плата и денежная компенсация) в период освоения изделий новой техники (при $n_\phi = n_n$)

$$Z_\Sigma = kn_n d + (n_T - n_n)d, \quad (7)$$

Фактическая расценка на изделие в этот период

$$d_\phi = (kn_n d + (n_T - n_n)d)/n_n = kd + (n_T/n_n - 1)d. \quad (8)$$

В начале периода освоения изделий новой техники значение k мало, а отношение n_T/n_n , наоборот, велико, поэтому $d_\phi > d$, а заработок рабочего большей частью формируется за счет денежной компенсации (рис. 2). Происходит конвертирование денежной компенсации в расценку на изделие, продолжающееся в течение всего периода освоения.

По мере роста норм выработки значения n_n и k возрастают, в результате чего уменьшается составляющая компенсационных доплат, входящая в заработок рабочего, большая часть которого формируется уже за счет заработной платы. Фактическая расценка при этом падает.

К концу периода освоения изделий новой техники, когда $n_n \rightarrow n_T$ и $k \rightarrow 1$, заработок рабочего практически полностью определяется заработной платой. При этом фактическая расценка приближается к расчетной ($d_\phi \rightarrow d$) и становится равной ей при $n_n = n_T$ и $k = 1$.

Таким образом, без каких-либо пересчетов фактическая расценка в конце периода освоения новой техники автоматически снижается до расчетного значения, не требуя вмешательства службы нормирования, задача которой, как правило, заключалась в том, чтобы «срезать» расценки по мере роста производительности труда рабочего. Это всегда вызывало недовольство и нарекания людей.

Для расчета роста средней нормы выработки по кривым (см. рис. 1), описываемым уравнением (1), необходимо, прежде всего, найти площадь под этой кривой на данном участке ($T_1 - T_2$) и поделить результат на длину этого участка. Площадь под кривой

$$A(T) = \int_{T_1}^{T_2} \left(1 - \exp \left[\frac{\gamma}{n} (1 - e^{-nT}) - (\gamma + h)T \right] \right) dt. \quad (9)$$

Поскольку выразить интеграл (9) через элементарные функции не удастся, то вычислим его приближенно [2]:

$$A(T) \approx \frac{T_2 - T_1}{m} \sum_{i=1}^m f(T_i),$$

где m — число разбиений участка (T_1, T_2). Норма выработки на данном участке выразится как

$$\bar{E}(T) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m f(T_i), \quad (10)$$

где $T_i = T_0 + \frac{T_2 - T_1}{m} i, i = 1, 2, \dots, m, T_0 = T_1, T_m = T_2$.

Поскольку наблюдать изменения нормы выработки непрерывно нельзя, то замена непрерывной функции суммой дискретных величин вполне правомерна.

Умножая $\bar{E}(T)$ на N_T , получим выражение для абсолютной нормы выработки и, умножив его на значение ($T_1 - T_2$), вычислим число изготовленных рабочим изделий за этот временной период.

Доплата $P(T)$ рабочему за отсутствие должного навыка при освоении новой технологической операции должна производиться как разность между требуемым, согласно первому (плановому) сценарию, числом и числом изготовленных деталей, но



не более разности, определяемой по плановому сценарию, т. е. в соответствии с формулой

$$P(T) = N \left[(T_2 - T_1) - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m f(T_i) \right] d \leq \\ \leq N \left[(T_2 - T_1) - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m f_n(T_i) \right] d,$$

где $f_n(T_i)$ — функция роста норм по предпочтительному (планируемому) руководством сценарию.

Функция, по которой руководство формирует предпочтительный сценарий, должна соответствовать квалификации рабочего, требуемой по данному технологическому процессу. Параметры γ , h и η могут быть определены по методу, описанному в работе [3]. По полученным коэффициентам рассчитывается функция, которая служит основой для выбора ВПКК. Важный момент при написании сценария для рабочего состоит в выборе промежутков времени, на протяжении которых действует то или иное значение коэффициента k . Чем на большее число промежутков разбивается время становления требуемой нормы выработки, тем меньше заработок рабочего за истекший временной промежуток. Поэтому система индивидуального стимулирования должна быть построена таким образом, чтобы у рабочего не складывалось впечатление, что он по существу ничего не зарабатывает на данной технологической операции. В противном случае у него будет складываться впечатление, что его квалификацию и опыт совершенно не ценят, и ему психологически будет трудно заставить себя стремиться к повышению норм выработки. Особенно это касается начального участка кривой, где из-за отсутствия опыта и навыков рабочий не может достичь высоких показателей по норме выработки. Поэтому на начальном временном участке ВПКК желательно выбирать так, чтобы он соответствовал точке на кривой, ордината которой близка к 0,7, т. е. соответствует моменту (как это указано ранее), когда рабочий должен уже привыкнуть к данной технологической операции.

Поскольку все расчетные операции формализованы и без труда могут автоматически выполняться компьютером, то следует составить несколько сценариев с различными коэффициентами k и выбрать из них тот, по которому соотношение между зарплатой рабочего и его трудом должно быть оптимальным.

2. ПРИМЕР

Положим, что для руководства предпочтительнее сценарий, изображенный кривой 1, менее предпочтительнее сценарий по кривой 3 и еще менее предпочтительнее сценарий по кривой 2 (см. рис. 1). При этом примем, что на временном промежутке от 0 до 1,6 нед (рабочей недели, равной 7 рабочим дням) согласно рис. 1 (кривая 1) и выражению (2) будет действовать коэффициент $k = k_1 = (0,7)^2 \approx 0,5$; на промежутке от 1,6 до 2,4 нед — коэффициент $k = k_2 = (0,9)^2 \approx 0,8$ и на промежутке от 2,4 до 3,2 нед — коэффициент $k = k_3 = 1^2 = 1$. Кроме того, примем требуемую норму выработки N равной 1000 шт./нед, а расценку d на деталь — 10 руб./шт.

В соответствии с формулой (10) средняя норма выработки $\bar{E}(T)$ на участке 0÷1,6 нед для рабочего, рост норм которого соответствует кривой 1, будет равен 430 шт./нед в период 0÷1,6, 910 шт./нед в период 1,6÷2,4 и 980 шт./нед в период 2,4÷3,2 нед. Умножая $\bar{E}(T)$ на величину N_T , получим выражение для абсолютной нормы выработки и, умножив его на значение $(T_2 - T_1)$, вычислим число изготовленных рабочим изделий за указанные временные периоды. Соответственно получим 688, 728 и 784 шт. При этом средняя норма выработки за все время (0÷3,2) составит 688 шт./нед, а число изготовленных за это время деталей будет равно 2200 шт.

По формуле (3) основная заработная плата рабочего составит за период 0÷1,6 нед величину

$$Z_{\text{осн}} = k n_{\phi} d = 0,5 \cdot 688 \cdot 10 = 3440 \text{ руб.},$$

если он будет работать по плановому сценарию роста норм выработки.

За второй период 1,6÷2,4 $Z_{\text{осн}} = k n_{\phi} d = 0,8 \cdot 728 \cdot 10 = 5824$ руб., а за третий — $Z_{\text{осн}} = 1 \cdot 784 \cdot 10 = 7840$ руб. При этом суммарная основная заработная плата будет равняться $Z_{\Sigma \text{осн}} = 17\,104$ руб. Следовательно, среднее значение ВПКК за все указанное время

$$k = \frac{Z_{\Sigma \text{осн}}}{n_{\phi} d} = \frac{17\,104}{2200 \cdot 10} = 0,78.$$

Вследствие отсутствия должного навыка и опыта недостаток деталей за первый период $\Delta n_{\phi} = N_T T - n_{\phi} = 1000 \cdot 1,6 - 688 = 912$ шт., а за второй и третий периоды — 72 и 16 шт.

Тогда денежная компенсация за первый период, исходя из количества недоданной рабочим продукции ($n_{\phi} = n_n$), согласно уравнению (5) выразится как $K = (n_T - n_n) d = (1600 - 688) \cdot 10 = 9120$ руб., а за второй и третий периоды — 720 и 160 руб.

По этой же формуле рассчитывается доплата рабочему, рост норм выработки которого соответствует кривой 2 ($n_{\phi} < n_n$). Исходя из условия $K = (n_T - n_n) d$, $n_{\phi} \leq n_n$, доплата этому рабочему будет такой же.

Рост норм выработки у рабочего, изображенный кривой 3 выше планового ($n_{\phi} > n_n$). Согласно условию

$K = (n_t - n_\phi)d$, $n_\phi > n_n$, расчет ведется по формуле (4), и для первого временного периода его денежная компенсация $K = (n_t - n_n)d = (1600 - 1077) \cdot 10 = 5230$ руб., а для второго и третьего временных периодов — соответственно 90 и 10 руб.

Далее по уравнению (7) рассчитывается суммарный заработок рабочего в период освоения изделий новой техники. Для первого периода планового сценария

($n_\phi = n_n$) $Z_\Sigma = kn_n d + (n_t - n_n)d = 0,5 \cdot 688 \cdot 10 + (1600 - 688) \cdot 10 = 12\,560$ руб., для второго и третьего — 6544 и 8000 руб. Суммарный заработок за все время работы получится равным 27 104 руб.

По формуле (8) определяется фактическая расценка на деталь, которая для первого временного периода $d_\phi = kd + (n_t/n_n - 1)d = 0,5 \cdot 10 + (1600/688 - 1) \cdot 10 = 18,25$ руб., а для других периодов — 8,99 и 10,2 руб./шт.; при этом средняя расценка составит 12,32 руб./шт.

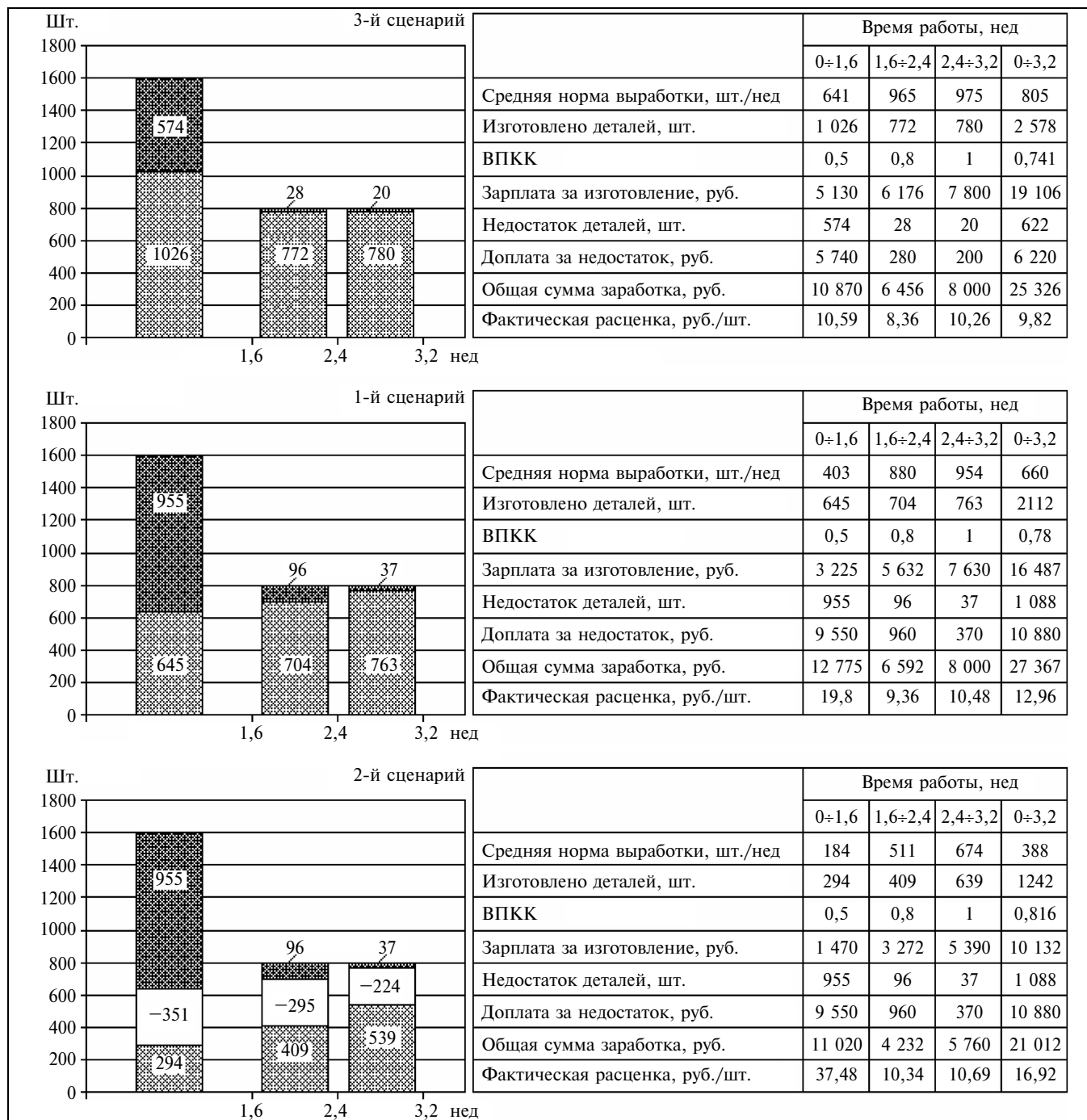


Рис. 3. Рост заработной платы и норм выработки по разным сценариям при действующем временном плановом квалификационном коэффициенте



Аналогичным образом рассчитываются оставшиеся показатели для третьего и второго сценариев. Для удобства все расчеты сведены в таблицы и иллюстрированы диаграммами (рис. 3).

Как видно из приведенных диаграмм и таблиц, доплата, рассчитанная по формулам (4) и (5) по трем кривым различна. Например, на участке от 0 до 1,6 нед. доплата по первому и третьему сценарию осуществляется соответственно за 912 и 523 детали, а по второму — только за 912 деталей, т. е. на 371 деталь меньше существующей фактической разницы ($1600 - 317 = 1283$). Такой порядок доплаты к заработной плате, рассчитанному по действующему ВПКК, достаточно сильно ограничивает стимулирование по второму сценарию. Это, в конечном счете, не позволяет рабочему хорошо зарабатывать при низких темпах работы. Поскольку такое ограничение особенно действенно на втором и третьем временных участках, то во время работы на первом участке появляется возможность для подбора кадров на данную технологическую операцию, весьма не ущемляя при этом интересы трудящихся.

Из всех рассмотренных сценариев самым привлекательным оказывается первый, т. е. устраивающий руководство. Отклонение роста норм выработки как в одну, так и в другую сторону влечет за собой снижение заработной платы рабочего. Планомерное повышение ВПКК в течение становления нормы выработки способствует заинтересованности рабочего в постоянном увеличении достигнутых результатов, поскольку он знает, что в следующий период времени при выполнении планового задания он заработает больше, чем в предыдущий период. Ему также известно, что доплата за недостающую продукцию неуклонно снижается и невыполнение нормы выработки приведет к снижению заработка.

Каждому рабочему в соответствии с его квалификацией (разрядом) может быть распечатан график требу-

емого роста норм выработки и числа изготавливаемых деталей. Желательно также снабдить рабочего возможными сценариями хода технологического процесса, чтобы у него сложилась ясная картина о перспективе своей трудовой деятельности и зарплате.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные выражения позволяют рассчитывать нормы выработки, заработную плату и вознаграждение рабочего с учетом его квалификации и в соответствии со складывающимися в данный момент обстоятельствами на производстве. Достоинство предложенной системы стимулирования состоит в том, что все процедуры формализованы и могут осуществляться компьютером в автоматическом режиме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новиков Д.А. Обобщенные решения задач стимулирования в активных системах. — М.: ИПУ РАН, 1998.
2. Математическая энциклопедия. — М.: Советская энциклопедия, 1984. — Т. 4. — С. 723.
3. Оленев С.Е. Оценка параметров модели для прогнозирования сроков выпуска деталей и узлов при производстве изделий новой техники // Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Современные информационные технологии в образовательном процессе и научных исследованиях». — Шуя: Весть, 2004. — С. 60 — 65.

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Н. Бурковым.

Оленев Сергей Евгеньевич — канд. техн. наук, управляющий производством, ЗАО «Де Ла Рю СНГ», г. Сергиев Посад, ✉ s.olenev@mail.ru.



Четвертая международная конференция «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2010)

4—6 октября 2010 г.,
Москва, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

Основные тематические направления конференции:

- проблемы управления развитием крупномасштабных систем, включая ТНК, госхолдинги и госкорпорации;
- методы и инструментальные средства управления инвестиционными проектами и программами;
- имитация и оптимизация в задачах управления развитием крупномасштабных систем;
- управление топливно-энергетическими, транспортными и другими системами;
- управление объектами атомной энергетики и другими объектами повышенной опасности;
- информационное и программное обеспечение систем управления крупномасштабными производствами;
- мониторинг в задачах управления крупномасштабными системами.

Допускается заочная форма участия в конференции, предусматривающая представление докладов на видеороликах.

URL: <http://mlsd.ipu.rssi.ru>, ✉ kuzn@ipu.ru, ☎ (495) 334-90-50, 334-91-69.

АГЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК СРЕДСТВО АНАЛИЗА И ПРОГНОЗА СПРОСА НА ЭНЕРГОРЕСУРСЫ

С.А. Суслов, М.А. Кондратьев, К.В. Сергеев

Рассмотрена методика прогнозирования спроса на энергоресурсы на основе имитационной модели. Описаны преимущества применения агентного имитационного моделирования, предложен метод задания агентов-потребителей энергоресурсов в среде имитационного моделирования AnyLogic, разработана методика оценки рисков инвестиционных проектов с помощью имитационного моделирования.

Ключевые слова: имитационное моделирование, агентный подход, AnyLogic, прогнозирование спроса на энергоресурсы, управление на основе моделей, оценка рисков, система поддержки принятия решений.

ВВЕДЕНИЕ: ЗАДАЧА АНАЛИЗА И ПРОГНОЗА СПРОСА

При разработке инвестиционных проектов развития систем энергоснабжения один из определяющих факторов экономической эффективности проектов заключается в адекватной оценке прогнозного спроса на энергоресурсы (мазут, уголь, торф, электроэнергия, сжиженный и природный газ и др.). Эта оценка может быть получена на основе кривой эластичности спроса по цене, характеризующей влияние цены энергоресурса на спрос со стороны потребителей. Разница между прогнозным спросом и фактическим потреблением составляет потенциал развития сбыта данного энергоресурса в регионе. В зависимости от значения этого потенциала можно принимать решения о размерах инвестиций в распределительные сети, сроках ввода новых объектов в соответствии с динамикой спроса.

Цель настоящей работы состоит в построении автоматизированной системы поддержки принятия решений (СППР), позволяющей путем параметризации цены энергоресурса алгоритмически построить семейство функций спроса (кривых эластичности спроса по цене) при различных вариантах цен на альтернативное топливо. Выбор объемов потребления напрямую влияет на коммерческий риск при реализации проекта, что указывает на необходимость его прогнозирования.

1. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦЕНОВОЙ ЭЛАСТИЧНОСТИ

Наиболее важная задача, которую необходимо решить в рамках данного исследования, — выбор метода автоматизированного построения кривых эластичности. Можно выделить несколько методов определения ценовой эластичности (см. таблицу).

Рассмотрим, какие из этих методов применимы при создании автоматизированной системы.

Необходимая для статистического анализа информация недоступна при анализе спроса на энергоресурсы. Даже если она доступна по другим регионам, то абстрагирование от региональной специфики сделает невозможным ее использование для принятия решений.

Постановка ценовых экспериментов невозможна в масштабах региона, возможно лишь один раз инвестировать в строительство сети снабжения и узнать — оправдались ли сделанные прогнозы.

Проведение опроса — метод, неприменимый для рынка энергоресурсов. В других областях существует возможность создать опрос на веб-сайте компании, сохранить результаты в базе данных и использовать эту информацию в СППР. Но клиенты-потребители газа или мазута — это в основном не частные лица, а организации, решения в которых принимаются коллегиально группой лиц.

Единственным доступным методом остается математическое моделирование. Предпринято немало попыток описания группового поведения потребителей с помощью математических формул.



Традиционные методы определения ценовой эластичности

Методы	Сложности применения
Обработка статистической информации о продаже товаров на различных рынках или на одном рынке, но в разные моменты времени и по разным ценам Постановка ценовых экспериментов (цены можно менять в течение определенного времени в нескольких магазинах или назначать различные цены на одинаковые товары в нескольких магазинах)	Необходима хорошая база данных, приведенная к одинаковым условиям относительно рыночных сегментов, типов потребителей, мест продажи, влияющих на ценовую эластичность Важно сохранять неизменными все остальные факторы. Подобный эксперимент под силу далеко не всем компаниям, поскольку требуются значительные средства и, кроме того, на продажи помимо цен влияют и другие факторы, которые не поддаются контролю
Опрос потребителей в целях выяснения, при каких ценах они готовы покупать определенные товары Построение математических моделей, описывающих поведение групп потребителей	На практике наблюдается существенное отличие между высказываниями потребителей и их реальным поведением на рынке Моделирование поведения человека, перевод на язык формул многих психологических и социальных факторов с выработкой конкретных количественных рекомендаций, интересующих практиков, — трудноразрешимая задача

Существуют классические модели, решающие задачу потребительского выбора. Они учитывают в основном бюджетные ограничения и не позволяют описать специфику товарной категории.

Кроме того, потребители действуют в обществе, поэтому на их выбор воздействуют факторы, которые определяются бизнес-окружением. Одним из таких факторов — влияние других компаний. В бизнес-среде, где общаются руководители компаний и другие лица, принимающие решения, часто существует устоявшееся мнение, которое утверждает, что наиболее выгодно использование одного из конкурирующих энергоресурсов. Не всегда это мнение экономически обоснованно, часто продукт популярен просто из-за большого числа потребителей, формирующих его популярность.

Другой социальный фактор состоит в инертности потребителей при принятии решений. Даже если переход на другой энергоресурс экономически эффективен, на практике такой переход происходит со значительной задержкой. Причины задержки как в самом процессе принятия решения, так и в технических вопросах, связанных с переходом. Крупные компании более инертны, им требуется больше времени на принятие решения о смене энергоресурса. Так как цена ошибки высока, необходимо дать технико-экономическое обоснование перехода, согласовать решение с техническими службами, подготовить предприятие к использованию нового энергоресурса. Руководство такого предприятия дважды подумает, прежде чем заменить используемый энергоресурс, даже если это решение позволит компании сократить издержки. Да и сам технологический процесс наладки оборудования на крупных предприятиях занимает больше времени. Более мелкие же компании более мобильны, руководство может быстро принять решение о переходе на другой энергоресурс и поручить техническому персоналу перестроить процесс.

Чрезвычайно сложно учесть социальные факторы при описании математической модели. Поэтому на практике от формульных зависимостей трудно добиться достаточно стабильных и надежных оценок эластичности для определения на их основе оптимальных цен. По оценкам экспертов точность определения ценовой эластичности этими методами составляет $\pm 25\%$ [1]. Такой значительный разброс может существенно повлиять на конечный результат при решении практических задач. Поэтому авторы предлагают взглянуть на проблему с другой стороны.

2. СОЦИОЭКОНОМИЧЕСКОЕ АГЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Обратимся к истокам экономики. Как утверждает одно из определений, «экономика — это наука, изучающая совокупность производственных и потребительских отношений». Вместе с тем, в сравнении с другими научными дисциплинами стандартная экономическая теория уделяет необычно мало внимания роли взаимодействий в экономике [2, 3].

Экономико-математические методы появились задолго до создания компьютерных технологий. Это не могло не наложить отпечаток на классические теории. Вместо того чтобы строить модели отношений между взаимодействующими субъектами в обществе, ученые делали многочисленные попытки обобщить эти взаимодействия до макроуровня, который хорошо описывался доступным в то время математическим аппаратом.

Методы компьютерного имитационного моделирования получили значительное развитие в последние десятилетия. Последним достижением в этой области стало «агентное моделирование». Появилась возможность описывать социально-экономические взаимодействия и порождаемые ими процессы практически без упрощений в реалистичном виде.

Отражением результативности этого подхода стало выделение в последние годы в составе различных общественных научных дисциплин самостоятельных направлений: «вычислительная экономика» (computational economics), «вычислительная социология» (computational sociology) и др. [4].

Современное направление развития имитационного моделирования в общественных науках в существенной степени выглядит как формирование агентных подходов к представлению поведения социально-экономических систем и создание соответствующих моделирующих комплексов. Уже стало достаточно популярным новое научное направление «Agent-based Computational Economics» (ACE), развивающее методологию компьютерных модельных исследований экономических процессов в виде динамических систем взаимодействующих агентов [2–4].

3. АГЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ

Вернемся к задаче построения кривых эластичности. Поведение потребителей энергоресурсов в условиях рыночной экономики невозможно адекватно отразить без моделирования процессов принятия решений о переходе на более выгодный энергоресурс. Должны учитываться дополнительные затраты, экономическая целесообразность такого перехода, инерционность, мнения других участников рынка и др.

Для учета этих факторов будем представлять потребителей энергоресурсов как индивидов, функционирующих на рынке энергоресурсов, рационально выбирая лучшие средства для достижения своих целей, учитывая при этом и другие, в том числе и социальные, факторы. Такие индивиды являются единицами, принимающими решения, — агентами. Процессы, происходящие на рынке энергоресурсов, будут рассматриваться в модели как интегральная сумма всех индивидуальных решений агентов. С использованием агентного подхода оказывается возможным учесть в модели основное предположение социэкономки, которое состоит в том, что люди принимают решения не только чисто рационально, но и на основе своих ценностных установок и эмоций [3]. Агентный подход позволяет формализовать в модели множество факторов, которые оказывают влияние на принятие потребителями подобных решений, что, в конечном счете, сказывается на объемах и сроках переходов потребителей от использования одного энергоресурса к использованию другого, эквивалентного ресурса. Этот подход также позволяет учесть различные виды энергоресурсов и технические характеристики потребителей произвольного региона.

В разработанной модели агенты — это активные объекты, которые характеризуют поведение некоторого множества однотипных потребителей энергоресурсов со сходным поведением при принятии решений в условиях рыночной экономики. Можно считать, что сходное поведение имеют потребители, находящиеся в одинаковых экономических и социальных условиях. Поэтому определим агента как кластер (некоторое число, множество) потребителей определенного типа. Они используют один и тот же вид энергоресурсов со сравнимыми объемами потребления и потому имеют одинаковую стратегию поведения на рынке.

Всего в модели учитываются около двадцати предложенных экспертами типов потребителей, которые можно разделить на три подгруппы: население, котельные различной мощности и промышленные предприятия, например, металлургические. Эти три подгруппы представлены в модели соответствующими типами агентов.

Особенности стратегий поведения различных типов потребителей выражаются определенными настройками параметров агентов. Например, некоторые типы агентов могут потреблять не любые типы энергоресурсов, для каждого типа энергоресурса это задается соответствующим бинарным признаком.

В рассматриваемой модели предусмотрено фиксированное число типов энергоресурсов. Представлены три основных вида ресурсов: газ, уголь и мазут, которые в свою очередь делятся на конкретные типы энергоресурсов, например, природный газ, каменный уголь и печное топливо.

Модель построена таким образом, что при необходимости число типов потребителей и типов энергоресурсов может быть задано без внесения изменений в исходный код, а потому такое разбиение по типам не имеет принципиального значения.

В общем случае, использование двумя однотипными потребителями одного и того же вида энергоресурса не гарантирует одинаковую стратегию поведения на рынке этих потребителей. Для отражения возможных различий в стратегиях поведения таких потребителей вводится дополнительная характеристика агента — вид агента. Например, в качестве вида агента можно принять такие градации, как крупный, средний, мелкий и пр.

Таким образом, для каждой из пар «тип потребителя — энергоресурс» создается определенное число агентов-кластеров (рис. 1), в соответствии с разделением потребителей по видам (в текущей версии модели предлагается деление на четыре вида агентов-кластеров).

Такие агенты-кластеры (или просто агенты) характеризуются примерно одинаковыми объемами потребления, так как кластер «крупных» потребителей включает в себя небольшое число таких пот-

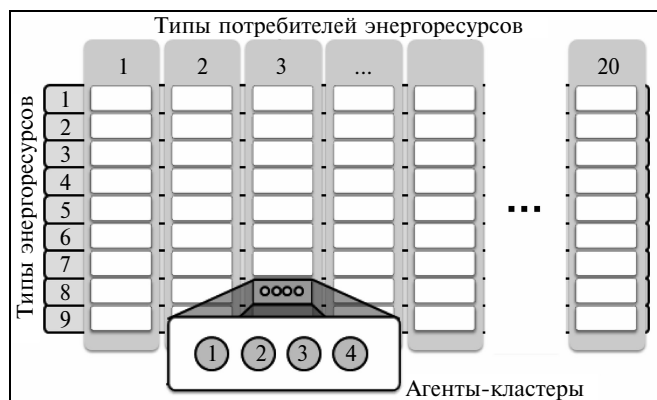


Рис. 1. Распределение видов агентов-кластеров в модели

ребителей с большими объемами потребления, а кластер «мелких» потребителей — большое число потребителей с небольшими объемами потребления. Хотя в среднем суммарные объемы потребления для кластеров могут быть приблизительно равны, поведение таких потребителей на рынке обычно отличается: мелкие потребители, как правило, более мобильны, они быстрее принимают решения и быстрее реализуют его, они более подвержены действию социальных факторов. Иными словами, при смене вида энергоресурса их готовность к смене ресурса выше, а инерционность при модернизации оборудования ниже, чем у крупных потребителей.

Итак, основные характеристики агента:

- тип потребителя;
- тип потребляемого энергоресурса;
- вид потребителя (крупный, мелкий и пр.) — определяет разделение на агенты-кластеры;
- объем потребления энергоресурса;
- коэффициент инерционности (от 0 до 1) — используется для моделирования влияния социального окружения (world of mouth [5]) на принятие решения потребителями в условиях рынка. Инерционность можно трактовать как вероятность перехода потребителя на другой тип ресурса при выполнении необходимых условий перехода (см. далее). Например, при коэффициенте, равном 1, осуществляется переход всех потребителей на новый ресурс. Нулевой коэффициент инерционности соответствует запрету на переходы, промежуточное значение этого коэффициента определяет переход части потребителей на использование соответствующего ресурса;
- другие параметры, характеризующие поведение агента на рынке энергоресурсов (степень доверия к информации, получаемой от других потребителей, — «влияние толпы» и др.).

Рассматриваемая модель в силу специфики задачи является полностью дискретно-событийной.

Дискретой анализа в модели служит один год, поэтому и дискретой времени выбран год, т. е. по окончании года рассчитываются все изменения, которые произошли с объектами модели за этот период. При необходимости, можно задать сколь угодно малую временную дискрету в модели, например, 1 день.

Важное место в агентной модели занимает поведение агента. Поведенческая модель агента используется при принятии им решения о переходе на новый энергоресурс. Данная модель реализована с помощью карты состояний (стейтчарта «behavior»), представленной на рис. 2. Стейтчарты (UML Statecharts, ведущие свое происхождение от карт состояния Харелла) являются основным формализмом, используемым в дискретно-событийном моделировании для задания последовательности событий, происходящих в модельном времени [6].

Агент может находиться в следующих состояниях:

- **stable** — состояние потребления этой категорией потребителей некоторого вида энергоресурса;
- **decisionMaking** — состояние проверки возможности (выгодности, приемлемости и т. п.) перехода на другой вид энергоресурса. Агент переходит в это состояние в конце каждого периода расчета (в конце каждого года). После перехода в это состояние агент оценивает выгоду перехода на использование других видов энергоресурсов. Если переход экономически не выгоден, переход не осуществляется, и происходит возврат агента в стабильное состояние **stable**. Если переход на какие-то энергоресурсы экономически выгоден, происходит переход в состояние **transferReadiness**;
- **transferReadiness** — состояние перехода на использование других видов энергоресурсов. Агент рассчитывает объемы, по которым будет осуществлен переход на использование конкретных видов энергоресурсов в следующем расчетном периоде, проводит сравнительный анализ выгодности переходов на каждый альтернативный энергоресурс, анализ социальной ситуации (какой процент потребителей данного класса уже перешли на этот вид

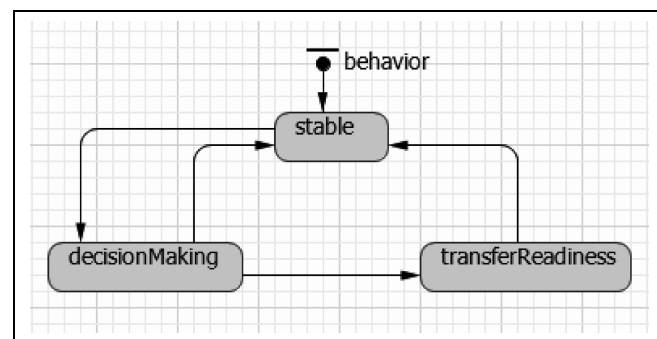


Рис. 2. Карта состояний — поведенческая модель агента

энергоресурса), а также учитывает другие параметры, которые могут влиять на переход. Именно на данном этапе решение о переходе может быть отклонено под влиянием неценовых факторов.

Переходы между состояниями выполняются при следующих условиях:

- из состояния *stable* в состояние *decisionMaking* — по истечении очередного года моделирования при условии, что переходы в модели разрешены;
- из состояния *decisionMaking* в состояние *stable* — если переход ни на один из энергоресурсов не выгоден для агента;
- из состояния *decisionMaking* в состояние *transferReadiness* — если агенту экономически целесообразен переход хотя бы на один из энергоресурсов;
- из состояния *transferReadiness* в состояние *stable* — по завершении всех необходимых подсчетов в состоянии *transferReadiness*. При данном переходе происходит перераспределение использования ресурсов, описывающее переход части потребителей кластера на использование новых видов энергоресурсов.

Для определения агентов в соответствии с описанным подходом в имитационной модели (ИМ) сделаны следующие предположения и допущения.

- В процессе работы модели число агентов всегда остается постоянным.
- Переход потребителей на использование других видов энергоресурсов моделируется изменением объемов потребляемых ресурсов у агентов, представляющих кластеры соответствующих потребителей. Иными словами, такие переходы представляются «перетеканием объемов» потребления от одного агента-кластера к другому. «Перетекание объемов» потребляемых ресурсов происходит к агентам-кластерам того же вида, т. е. перетекание осуществляется к агенту-кластеру, отличающемуся от данного только типом используемых энергоресурсов.
- Переход может быть осуществлен как на один вид энергоресурсов, так и на несколько, при условии, что это выгодно агенту. Переход выражается в «перетекании» соответствующих долей объема, используемого агентом энергоресурса, к другим агентам.
- При переходе всех потребителей, объединенных в один кластер, на использование других энергоресурсов объем потребления соответствующего агента полагается равным нулю. Агент с нулевым объемом потребления соответствует отсутствию потребителей данного кластера.
- Ввод новых потребителей в процессе функционирования ИМ выражается в наращивании объемов потребления энергоресурсов у агентов с соответствующими параметрами.

- Вероятность перехода (коэффициент инерционности) потребителей типа i с использования ресурса вида j на использование энергоресурсов вида k зависит от объема потребления (другими словами, числа потребителей) для агента такого же вида и типа потребителей, использующих k -й вид энергоресурсов. Иными словами, чем больше потребителей определенного типа используют какой-либо из энергоресурсов, тем выше вероятность того, что потребители данного типа перейдут на использование этого энергоресурса в случае, если это экономически целесообразно.
- Вероятность перехода на использование другого вида энергоресурсов зависит как от разницы цен, так и от коэффициента инерционности. Коэффициент инерционности, в свою очередь, зависит от объемов потребления (см. предыдущий пункт).

Для программной реализации модели необходимо воспользоваться одним из существующих пакетов имитационного моделирования, поддерживающих:

- агентное моделирование;
- дискретно-событийное моделирование;
- объектно-ориентированное «иерархическое» моделирование;
- доступ к базам данных;
- возможность динамической работы с агентами (добавить, удалить, изменить поведение);
- графические структуры для задания поведения агентов (карты состояний, блок-схемы).

Опираясь на сравнительный анализ пакетов [7], в качестве инструментального средства имитационного моделирования была выбрана система имитационного моделирования AnyLogic (www.anylogic.ru).

4. ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ И РИСКА

При планировании долгосрочных решений и проведении экономического анализа неизбежны различного вида неопределенности в данных и зависимостях, влияющих на результат анализа. Неопределенность — это неизбежное следствие неполного или неточного представления о параметрах и тенденциях. Неопределенности можно классифицировать на экономические (изменения в экономике страны или предприятия, колебания рыночного спроса, неопределенность рыночных цен и т. п.), политические (изменение политической обстановки и приоритетов государства), финансовые (плохо предсказуемые изменения курсов валют, изменение конъюнктуры рынка, процентных ставок займов и условий инвестирования и т. д.) и др.

При экономическом анализе фактор неопределенности часто игнорируется, и решение принимается на основании анализа детерминированных



моделей в предположении, что все факторы, влияющие на экономическую ситуацию, известны точно. В результате решения, принятые на основании таких моделей, приводят к значительным экономическим потерям. При проведении исследований, цель которых заключается в экономическом прогнозе на несколько лет, необходимо учитывать фактор неопределенности, который неизбежно сопутствует такого рода прогнозам и усложняет анализ.

Сложность анализа моделей, в которых присутствует неопределенность, связана с необходимостью выбора определенных альтернатив и расчетом вероятностей результатов и возможных потерь, т. е. учет неопределенности приводит к анализу риска. Из экономической практики известно, что для получения прибыли в условиях рыночной экономики предприниматель должен идти на риск. Но осознанным риск может быть только в том случае, если предприниматель может количественно оценить предполагаемую прибыль и сопутствующий этой прибыли риск для каждого из возможных вариантов решений. Имитационное моделирование на основе построенной модели позволяет количественно оценить риск, связанный с реализацией проекта по развитию систем энергоснабжения.

По мнению авторов, наиболее перспективное направление изучения свойств анализируемых процессов и принятия решений на основе имитационных моделей состоит в проведении серии компьютерных экспериментов. Имитационная модель позволяет учесть случайные воздействия (события, переходы, возмущения) и получить реализацию случайного процесса в качестве результата выполнения модели. Применительно к разработанной модели такой режим назван стохастическим.

Стохастический режим реализуется как многократный прогон (число прогонов n задается пользователем) ИМ для выбранного временного диапазона (или конкретного года). Каждый запуск ИМ в таких сериях производится при новых значениях случайных возмущений, выбираемых из предусмотренного множества. В целях реализации этого режима ряд параметров (начальные цены на энергоресурсы, начальный объем потребления энергоресурсов, коэффициент инерционности и др.) моделируются как случайные величины. Их математические ожидания соответствуют параметрам детерминированных режимов, дисперсии (средне-квадратичные отклонения) задаются пользователем. Предусматриваются виды распределений, которые обеспечивают возможность положительных и отрицательных вариаций исходных параметров.

С теоретической точки зрения, получаемые в этих условиях переменные x (например, текущая цена, объем потребления, прибыль, доход и пр.) на

определенном временном интервале могут быть классифицированы как случайные процессы с переменными моментами распределений. Анализ случайных процессов по выборочным данным осуществляется путем анализа сечений таких процессов для конкретных моментов времени t_i . Сечение $x(t_i)$ соответствует случайной величине, множество n значений которой формируется в результате компьютерных экспериментов.

Интерпретация анализируемой переменной $x(t_i)$ в качестве случайной величины позволяет применить в таком анализе мощный арсенал средств математической статистики. Так, для случайной величины $x(t_i)$, где t_i — выбранный год, вычисляются выборочное среднее, выборочная дисперсия или корень из нее (выборочное средне-квадратическое отклонение), для выбранных уровней значимости формируются интервальные оценки. Строятся гистограммы выборочных распределений анализируемых переменных. Гистограммы используются для оценок вероятностей различных ситуаций. Дополнительно, при анализе в процессе реализации стохастического режима переменной X , с помощью которой можно охарактеризовать экономическую эффективность принимаемого решения, могут быть назначены пороговые значения d_0 , d_1 , d_2 и т. д., отражающие границы минимальной и допустимой, критической зон значений X . В качестве такой величины X может выступать один из критериев доходности инвестиционного проекта, например, чистый дисконтированный доход NPV (Net Present Value), внутренняя норма доходности, срок окупаемости инвестиций и т. д.. Вероятности попадания значений X в эти зоны также могут быть вычислены с помощью гистограмм случайной величины X для выбранного интервала времени (рис. 3).

Таким образом может быть достигнута исключительно важная возможность анализа динамики угроз (рисков) эффективного развития проекта, позволяющая выйти на ряд превентивных мер по минимизации рисков. На этой основе может быть создана методика практического применения ИМ в процессе принятия решений.

Инвестиционный проект (результат принятого решения) считается эффективным, если его доходность и риск сбалансированы в приемлемой для участника проекта пропорции. Наиболее интересными и важными сценарии работы ИМ:

- поиск вариантов решений с оптимизацией прибыли при фиксированном уровне риска;
- поиск решений с минимизацией возможных рисков при выборе вариантов решений, дающих гарантированную прибыль.

Разработанная имитационная модель позволяет выполнить такой анализ.

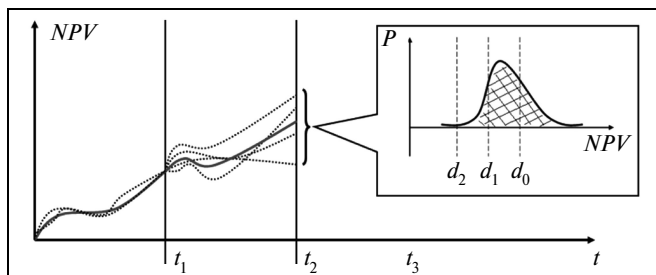


Рис. 3. Количественная оценка рисков: $NPV \leq d_0$ — минимальная угроза; $NPV \leq d_1$ — допустимая угроза; $NPV \leq d_2$ — критическая угроза

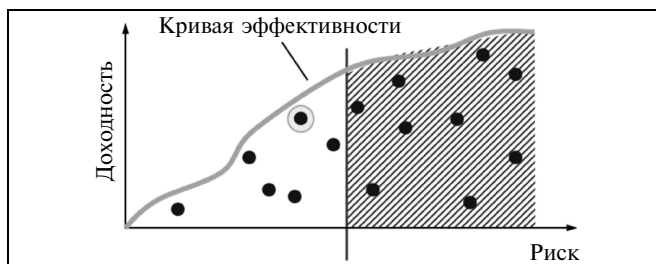


Рис. 4. Альтернатива риска и доходности

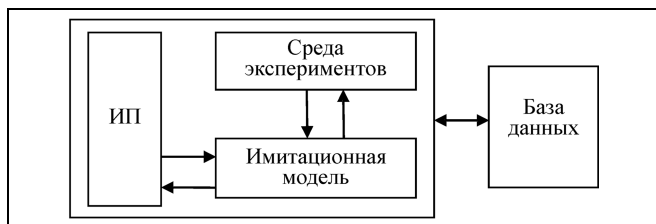


Рис. 5. Структурная схема СППР

На рис. 4 изображены результаты многократного выполнения ИМ. Каждая точка представляет собой результат многократного выполнения ИМ с определенным набором параметров. Результаты отображены в координатах доходности (математическое ожидание прибыли) и риска (вероятность неблагоприятных исходов).

Данный график облегчает решение задачи выбора наилучшего варианта реализации при фиксированном риске. Проведем линию, отображающую заданный уровень риска, отбросим все варианты реализации проекта, риск которых больше заданного, т. е. варианты правее черты (заштрихованы). Выберем среди этого множества вариант с наибольшей доходностью (на рис. 4 обведен кружком) — это и будет искомым наилучшим вариантом реализации при заданном уровне риска. Прodelав эту операцию для разных значений риска, получим кривую эффективности проекта (кривую Марковица).

Описанная методика полностью реализована в модели. С инженерной точки зрения разработан-

ная модель — это информационная система, а точнее, СППР. Информация о регионе хранится в базе данных, модель обращается к базе за исходными данными и для записи результатов. Разработаны средства для экспериментов с моделью: стохастического анализа и оптимизации. Для работы с моделью разработан интерфейс пользователя ИП, поддерживающий несколько режимов. Данная архитектура (рис. 5) является стандартной для СППР, созданной с помощью среды моделирования AnyLogic.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена методика анализа и прогноза спроса на энергоресурсы в регионе. Методика основана на одном из последних достижений социальной экономики: агентном имитационном моделировании. На основе предложенной методики построена система поддержки принятия решений, позволяющая построить семейство функций спроса и определить эффективность инвестиционного проекта развития сетей энергоснабжения в регионе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гурьев Д. Максимизация выручки и прибыли // Sales Business. — 2005. — № 10.
2. Kirman A. Interaction, Economic Organisation and Aggregate Activity // Working Paper, GREQAM, EHESS and Université d'Aix-Marseille III, Institut Universitaire de France. — 2009.
3. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р. Компьютерное моделирование искусственных миров. URL: <http://scmai.miem.edu.ru/S/s2.htm> (дата обращения 30.06.09).
4. Паринов С.И. Новые возможности имитационного моделирования социально-экономических систем // Искусственные сообщества. — 2007. — № 3—4. — С. 26—61. URL: http://www.artsoc.ru/docs/Journal/45_r.pdf (дата обращения 30.06.09).
5. Борщев А.В. Практическое агентное моделирование и его место в арсенале аналитика // Exponenta Pro. — 2008. — № 3—4. URL: <http://www.gpss.ru/index-h.html> (дата обращения 30.06.09).
6. Карпов Ю.Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5. — СПб.: БХВ-Петербург, 2006.
7. Лычкина Н.Н. Технологические возможности современных систем моделирования // Банковские технологии. — 2000. — № 9. — С. 60—63.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Р.М. Нижегордцевым.

Суслов Сергей Алексеевич — аспирант,
✉ serge.suslov@gmail.com,

Кондратьев Михаил Александрович — студент 6 курса,
✉ kondratyev@dcn.infos.ru,

Сергеев Кирилл Вадимович — студент 6 курса,
✉ sergeev@dcn.infos.ru,

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, ☎ 8 (812) 297-16-39.

МОДЕЛИ, ЗНАНИЯ И ОПЫТ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОГЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ¹

А.Ф. Берман, О.А. Николайчук

Сформулированы общие принципы, подходы, методы исследования и управляющие воздействия, направленные на обеспечение техногенной безопасности. Рассмотрены аварии и техногенные чрезвычайные ситуации, обусловленные разрушением или разгерметизацией уникальных механических систем в составе сложных технологических комплексов, предназначенных для реализации процессов при экстремальных значениях технологических параметров опасных сред. Разработаны базовые положения методики исследования и обеспечения техногенной безопасности.

Ключевые слова: техногенная безопасность, причинно-следственный комплекс, состояния, методика, модели, знания, опыт, информационная технология.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей статье рассматривается техногенная безопасность, нарушение которой обусловлено авариями на сложных технологических комплексах (СТК), вызываемыми разрушением или разгерметизацией уникальных механических систем (УМС) в их составе, предназначенных для реализации химико-технологических, нефтехимических, энергетических, биотехнологических и других процессов при экстремальных значениях технологических параметров опасных сред. Специфика технологических процессов обуславливает уникальность механических систем, реализующих различные стадии процессов, и неповторимость причинно-следственных связей нарушения безопасности и формирования техногенных чрезвычайных ситуаций (ЧС) [1—6]. Оценка техногенной безопасности СТК, состоящих из УМС, на основе математического аппарата вероятностно-статистической теории надежности не позволяет получить данные требуемой точности, так как причинно-следственный комплекс изменения состояний УМС и СТК никогда не повторяется, за исключением некоторых событий.

¹ Работа выполнена при поддержке гранта президента РФ (проект № НШ—1676.2008.1), программы фундаментальных исследований ОЭМПУ РАН (2003—2008 гг.), Фонда содействия отечественной науке (2008—2009 гг.).

Сделана попытка представить информацию о процессах, явлениях, событиях и состояниях, формирующих и сопровождающих техногенные ЧС, в виде информационных, логических и математических моделей и тем самым сформировать методику исследования мультидисциплинарной проблемы «Техногенная безопасность».

Для моделирования знаний используется математический аппарат теории множеств, отражающий структуру знаний и данных, последовательность и способы их обработки. При разработке имитационной модели за основу принята математическая модель непрерывно-дискретных систем Н.П. Бусленко [7].

1. ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫЙ КОМПЛЕКС ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЙ СТК И УМС

На рис. 1 представлен причинно-следственный комплекс изменения состояний УМС, который определяет структуру исследования, как конечный итерационный процесс исследования всех фаз состояний — от дефекта до катастрофического отказа. На рис. 2 представлен причинно-следственный комплекс изменения состояний СТК, определяющий структуру исследования всех фаз состояний — от катастрофического отказа до техногенной ЧС. На каждом этапе исследования выполняются некоторые действия и операции, направленные на выявление факторов, обуславливающих нежелательные явления, процессы и события, влияющие

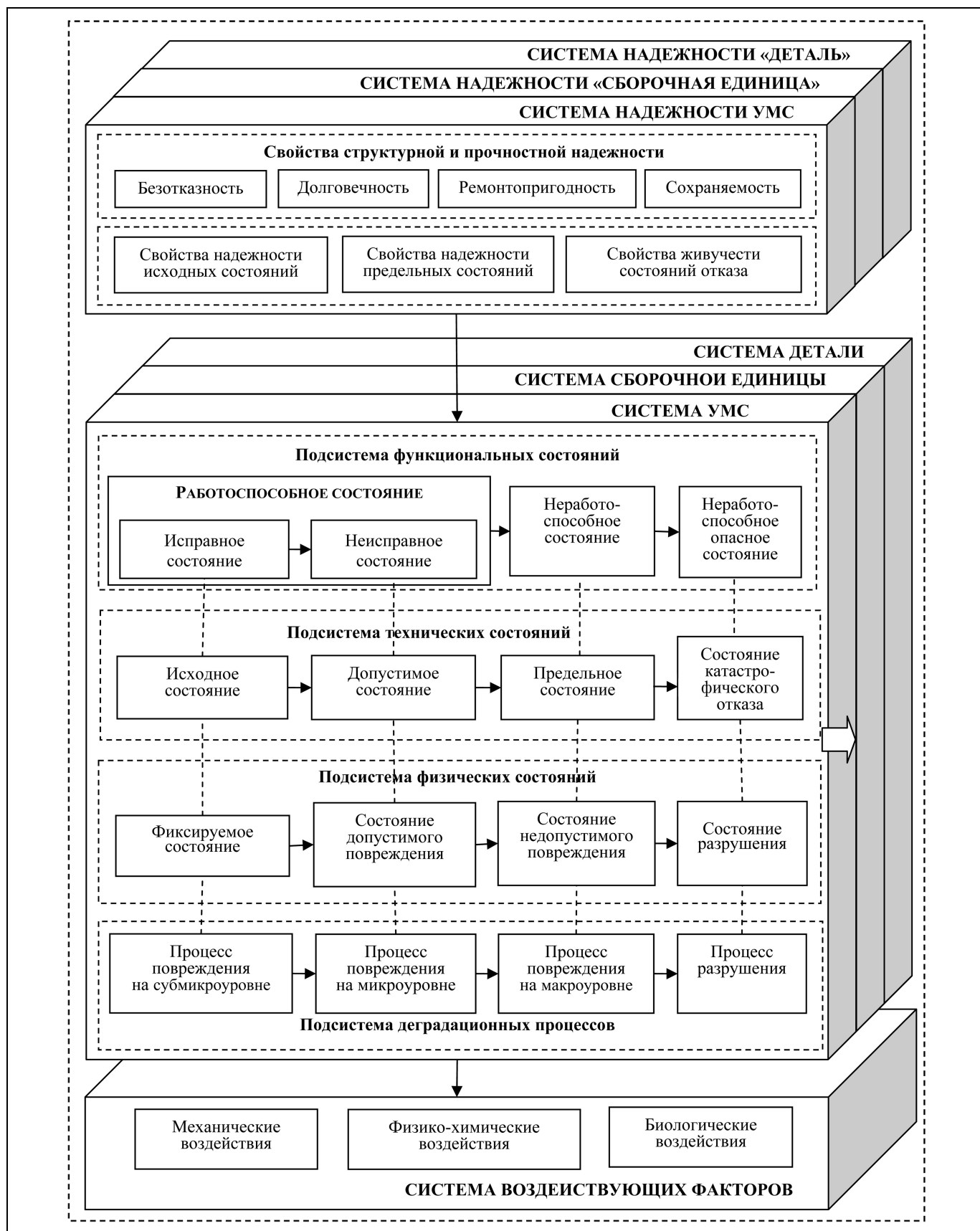


Рис. 1. Причинно-следственный комплекс динамики состояний УМС

на частоту и последствия опасных состояний, определение рациональных предупредительных, контрольных и защитных свойств объектов и их компонентов, обобщенных в понятии «свойства безопасности».

Представленный в виде иерархии подсистем причинно-следственный комплекс изменения состояний (см. рис. 1 и 2) обусловлен:

- структурой УМС и СТК;
- структурой пространства физико-технических и опасных состояний;
- множеством механизмов возникновения и разнообразием опасностей — причин нарушения безопасности;

- множеством сценариев развития каждой опасности;
- множеством вариантов решений, направленных на обеспечение свойств безопасности, удовлетворяющих приемлемому риску.

Каждая из подсистем — это информационный уровень, отражающий один из аспектов состояния рассматриваемого объекта. Понятие информационного уровня дает возможность объединения разнохарактерной информации об объекте: многообразие типов свойств, связей, состояний, рассматриваемых с различных теоретических позиций таких научных дисциплин, как материаловедение, физика и механика разрушения, теория

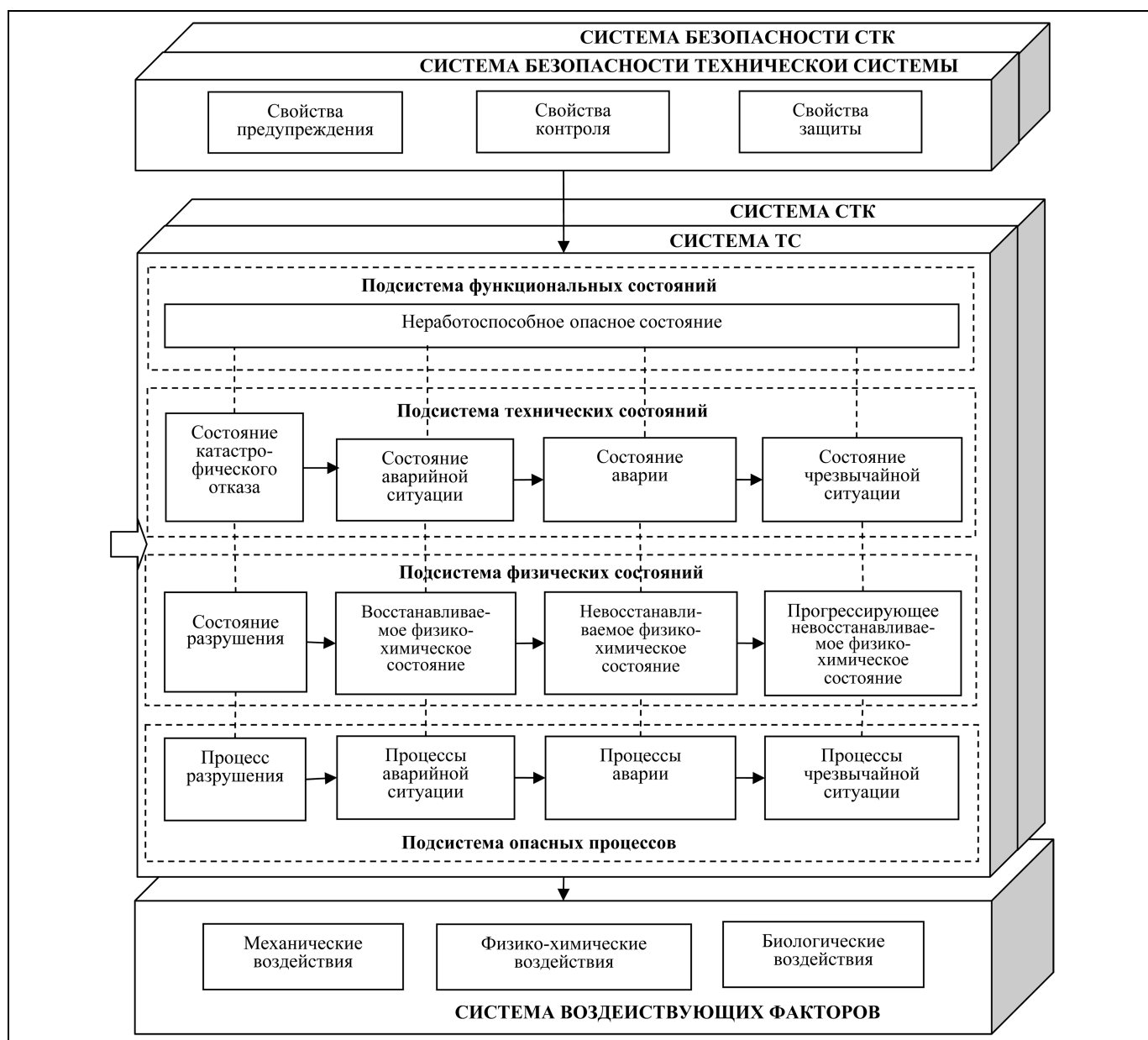


Рис. 2. Причинно-следственный комплекс динамики состояний СТК

эксплуатации, технического обслуживания и ремонта, теория надежности, безопасности и риска. Это позволяет исследовать модель в разных аспектах и на основе полученных знаний синтезировать целостное представление об объекте. Разрабатываемый подход обеспечивает моделирование в областях знаний далеких друг от друга по терминологическим понятиям и уровню математической проработки задач исследования.

Каждый информационный уровень описывает объект исследования в виде дискретно-непрерывной динамической модели, которая отражает процесс изменения состояния объекта в фазовом пространстве. Дискретные свойства каждого информационного уровня определяются необходимостью разбиения пространства состояний объекта на подпространства для отображения наблюдений, характеризующих кардинальную смену состояний объекта при переходе из одного подпространства в другое.

Аналитические зависимости, отражающие связи между базовыми состояниями, представленными на рис. 1 и 2, с динамикой нарушения техногенной безопасности в настоящее время, как правило, неизвестны. В связи с этим проблема обеспечения безопасности решается на основе, как минимум, двух подходов. В одном из них используется сочетание аналитических и эмпирических зависимостей из научных дисциплин, изучающих каждое базовое состояние. Второй подход основан на методах и средствах искусственного интеллекта, где имеющиеся аналитические и эмпирические зависимости дополняются неформализованными или слабоформализованными знаниями экспертов.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЙ И ПРОЦЕССА ИССЛЕДОВАНИЯ

Закономерности перехода состояний описываются информационно-логико-математической моделью, представленной сочетанием данных и знаний, хранящихся в базах данных, базах знаний, имеющихся в онтологиях и математических модулях. Подпространства состояний определены на основе обобщенного причинно-следственного комплекса процесса изменения состояний. Модель основана на агрегатной модели с детерминированными компонентами [7].

Используя выделенные информационные уровни и подпространства состояний, объект исследования представлен агрегатной моделью, компоненты которой имеют детерминированную природу [8]:

$$O = (T, C, X, Dg, U, Y, H, G, Risk),$$

где $T = [0, T_j] \subset R$ — конечный интервал моделирования, C — пространство состояний $c, c = (c_1, c_2,$

$\dots, c_n)$, где c_i — фазовые координаты, $\underline{c}_i \leq c_i \leq \bar{c}_i$, $\bar{c}_i$ — ограничения на значения фазовых координат, $i = \overline{1, n}$, $c(t)$ — фазовые траектории изменения состояния. Фазовые координаты описывают свойства объекта: функциональные, структурные, надежности и безопасности. Свойства надежности включают в себя свойства безотказности, долговечности, ремонтпригодности, сохраняемости, а также свойства прочностной надежности и ресурса. Свойства безопасности включают в себя свойства пожаробезопасности, взрывобезопасности, химической безопасности и др. Множество фазовых координат имеет объектно-ориентированную структуру: $c_i = (c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{iz})$, т. е. каждую координату при необходимости можно описывать набором собственных свойств. Пространство состояний C можно представить в виде разбиения

$$C = \sum_{j=1}^k C^j, \text{ соответствующего структурной схеме}$$

изменения состояния уникальной механической системы.

Далее, X — множество допустимых входов, $x = [x^1, \dots, x^l]$, где l — число «входных каналов», каждый из которых принимает входную информацию своего типа; Dg — множество выходных результатов dg мониторинга и (или) диагностирования объекта, $dg = [dg^1, \dots, dg^q]$. На этапе проектирования $Dg = \emptyset$; U — множество управляющих воздействий $u = [u^1, \dots, u^r]$ системы обеспечения надежности и безопасности объекта, которое определяется на основе причинно-следственных зависимостей «техническое состояние — управляющее воздействие», описанных, например, в виде продукционных правил; Y — множество выходной информации $y = [y^1, \dots, y^s]$, характеризующее параметры технического состояния; $H = (V_x, V_g, V_d, V_m, L, P)$ — оператор переходов, определяющий множество возможных текущих состояний по предыстории с некоторым фактором уверенности p : $(c^s(t), p^s) = H[c(0), t, p]$, $s = \overline{1, S}$, S — число текущих состояний; V_x, V_g, V_m, V_d — операторы формирования новых начальных условий и, возможно, нового поведения при приеме очередной входной информации, управляющего воздействия, информации с нижнего по иерархии информационного уровня и информации о результатах диагностирования соответственно; $L = \langle DB, Ont, KB, M \rangle$ — информационно-логико-математическая модель, описывающая поведение объекта на временных интервалах между событиями, DB — базы данных, Ont — онтология надежности, KB — базы знаний, M — математические модели; P — фактор уверен-



ности возможного поведения объекта, являющийся экспертной оценкой; G — оператор выходов, $y(t) = G[c(0), t]$, преобразующий информацию о состоянии объекта в контролируемые параметры технического состояния, например, получаемые с помощью датчиков контроля или органолептически; наконец, *Risk* — риск технического состояния, определяемый как сочетание экспертной оценки возможности данного состояния и ущерба, причиняемого данным состоянием. Риск определяется на основе факторов уверенности P предыдущих состояний.

Информационно-логико-математическое обеспечение как основной элемент технологии поддержки принятия решений по обеспечению безопасности объекта представляет собой сочетание (комбинирование) моделей, методов и средств. При этом закономерности динамики процессов и явлений, описываемые математическими моделями, содержатся в вычислительных модулях. Информация о свойствах объекта исследования и знания о процессах и явлениях содержатся в базах данных и знаний.

В результате исследования на моделях прогнозируются изменения параметров техногенной безопасности и обосновываются методы и средства обеспечения требуемых свойств безопасности.

3. ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

Результаты моделирования положены в основу информационной технологии исследования свойств и факторов, формирующих уровень техногенной безопасности. Технология определяется моделью объекта исследования, структурой и функциями процесса исследования, совокупностью методов и средств исследования и обеспечения безопасности и включает в себя этапы, действия и операции. Технология реализована комбинированным использованием объектно-ориентированного моделирования данных и знаний [9], рассуждений на основе моделей [10], рассуждений на основе прецедентов [11], математического (аналитического) моделирования и информационных технологий.

Комбинация подходов компенсирует недостатки их раздельного применения. Объектно-ориентированное моделирование на основе принципов объектно-ориентированной декомпозиции, абстракции и иерархии предметной области обеспечивает целостное представление о предметных понятиях и отношениях между ними. Прецедентный подход позволяет быстро и качественно находить приемлемое решение при наличии прецедентов (опыта). Метод рассуждений на основе моделей, содержащих знания о предметных сущностях, процессах и явлениях, применяется в случае отсут-

ствия прецедентов. Он требует дополнительного объема исходных данных и знаний.

Согласно иерархической модели процесс поиска решения задачи обеспечения надежности УМС представляет собой следующую последовательность шагов.

Шаг 1. На основании сведений об исходном техническом состоянии, воздействующих факторах и материале элемента делается вывод о возможном механизме деградационного процесса.

Шаг 2. Уточнение технологической наследственности элемента и вывод о возможной кинетике деградационного процесса.

Шаг 3. Уточнение кинетики и вывод о возможных проявлениях деградационного процесса.

Шаг 4. Уточнение проявлений и вывод о причинах возникновения деградационного процесса.

Шаг 5. Вывод о необходимых мероприятиях для устранения причин или снижения скорости деградационного процесса.

Последовательность указанных шагов повторяется для каждой стадии развития деградационного процесса.

Процесс поиска решения задачи обеспечения безопасности СТК представляет собой следующую последовательность шагов.

Шаг 1. Определение параметров возможного катастрофического отказа и обоснование мероприятий по предупреждению и локализации отказа.

Шаг 2. Определение параметров возможной аварийной ситуации и обоснование мероприятий по предупреждению и локализации аварийной ситуации.

Шаг 3. Определение параметров возможной аварии и обоснование мероприятий по предупреждению, локализации и снижению последствий аварии.

Шаг 4. Определение параметров возможной техногенной ЧС и обоснование мероприятий по предупреждению, снижению и ликвидации последствий ЧС.

Информация о процессе создания и эксплуатации СТК и УМС, включающая в себя обоснование всех ранее принятых решений по оценке и обеспечению техногенной безопасности должна храниться в компьютерных информационных системах (базах данных и знаний). При возникновении непредвиденных факторов обеспечивается возможность в кратчайшие сроки принять обоснованные решения, предотвратить задержку в изготовлении оборудования и (или) сократить время непредусмотренного простоя оборудования при эксплуатации. Именно, когда возникает необходимость восстановить аргументы, положенные в основу принятых ранее решений, а также обосновать новые решения с учетом возникших обстоятельств при существенных ограничениях во времени, в макси-

мальной степени проявляются преимущества информационных технологий и созданных на их основе систем поддержки принятия решений, в том числе экспертных систем [12].

4. ЭКСПЕРТНЫЕ СИСТЕМЫ

При работе с данными различных типов невозможно (за исключением простейших случаев) устанавливать связи, отражающие существующие между элементами данных зависимости. Если функциональные зависимости во многих случаях могут быть представлены в аналитическом виде, то классификационные связи типа родовидовых, причинно-следственных и других представить в аналитическом виде не представляется возможным. Только в системах, работающих со знаниями (системы искусственного интеллекта), сведения о таких связях между объектами представляются в явной форме. Благодаря этому обеспечивается компактное представление всей необходимой информации и единообразие ее обработки.

Применение методов и средств искусственного интеллекта позволяет существенно повысить эффективность и качество принимаемых решений в сложных недостаточно формализованных областях исследований и деятельности, к которым относится и безопасность технических объектов. В частности, метод экспертных систем (ЭС) обеспечивает использование знаний квалифицированных специалистов, примененных при решении различных проблем. Знания специалистов представляются в виде некоторого формализованного описания, например, последовательности развития каких-либо событий и принятых решений при проведении исследований, а также при обеспечении каких-либо свойств объекта. Экспертные системы позволяют пользователю, не имеющему глубоких знаний об исследуемом событии или процессе, получить приемлемое решение за короткий промежуток.

Функционирование ЭС во многом зависит от вида и качества формализации знаний, которые могут быть представлены в виде продукций, фреймов и др., а также в виде прецедентов. В зависимости от используемой модели представления знаний ЭС подразделяют на продукционные, прецедентные и др. При комбинации моделей представления знаний ЭС называют гибридными.

Прецедентные ЭС базируются на принципе принятия решений по аналогии, где прецедент — это компактное описание знаний о событиях, явлениях, процессах и состояниях, в котором представлены наиболее важные параметры и свойства событий, процессов и рассматриваемого объекта.

В общем случае в модели прецедента выделяют компонент описания проблемы и компонент решения проблемы. Свойства объектов предметной области, описывающие компоненты прецедента, выбираются в зависимости от типа поставленной задачи (или задач). Согласно прецедентному подходу процесс решения задачи представляет собой последовательность этапов поиска (извлечения) аналогов и повторного использования информации, содержащейся в извлеченных аналогах. Также возможна адаптация прецедента — это приближение решения аналога-прецедента к решению нового прецедента. Данный этап осуществляется путем качественного переопределения описания прецедента и (или) путем уточнения значений параметров и (или) с помощью продукционной ЭС.

Продукционный подход реализуется продукционными ЭС, которые содержат знания в виде правил типа «если A и B , то следует C », где A , B и C — какие-либо факты, события, явления. Данный подход применяется также для решения задач управления безопасностью.

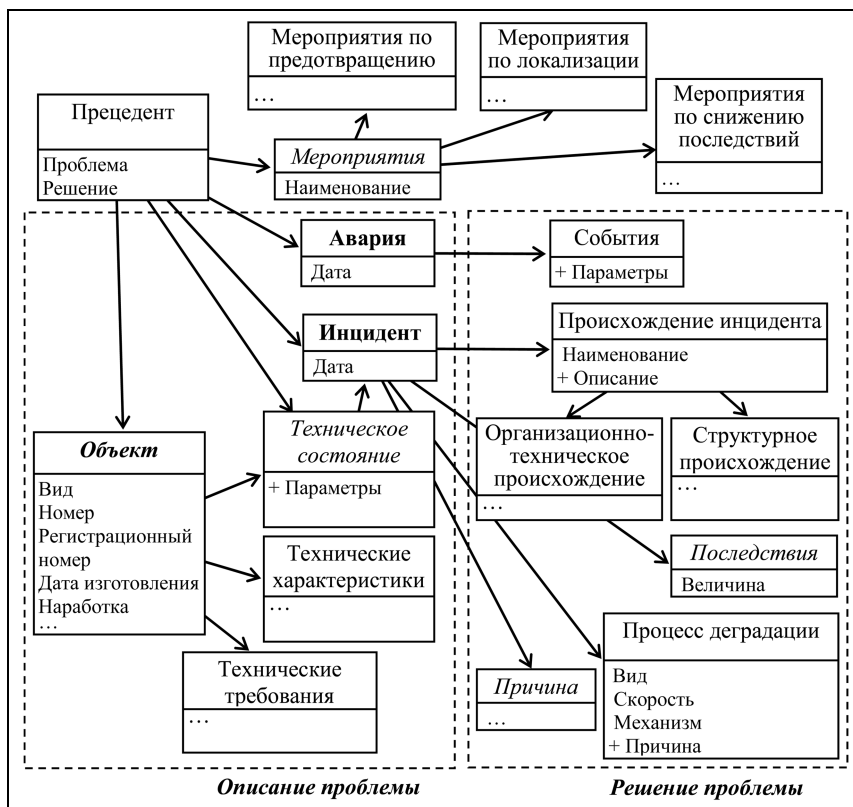


Рис. 3. Фрагмент логической модели прецедента



Рис. 4. Архитектура системы исследования и обеспечения надежности и безопасности техногенных объектов

Экспертные знания служат ключевым описанием закономерностей перехода состояний, так как отсутствуют аналитические зависимости, связывающие свойства объектов, воздействующие факторы с возможными параметрами аварий и катастроф. Для использования знаний экспертов, на основе методов искусственного интеллекта, разработаны прецедентные и продукционные модели и системы [13–22].

5. РЕАЛИЗАЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПРОГРАММНОЙ СИСТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ

Предложенный подход реализован в виде интеллектуальной системы, основные программные компоненты которой: база прецедентов, модуль реализации процедуры извлечения (поиска аналогов) прецедентов, база продукционных правил, модуль реализации вывода по правилам и библиотека математических модулей.

В качестве средства хранения прецедентов использована СУБД «Cache», обеспечивающая эффективное представление прецедентов в виде объектов или реляционных таблиц, что позволяет использовать объектное представление прецедентов и на уровне хранения данных. Логическая модель прецедента представлена на рис. 3.

Разработана технология компонентной сборки интеллектуальной программной системы [23].

При реализации модуля продукционной экспертной системы использована оболочка для построения продукционных ЭС «Clips» [24]. Аналитические функции реализованы в виде программных процедур специализированной динамической библиотеки. Графический пользовательский интерфейс и алгоритмическое обеспечение реализованы на языке Object Pascal (Borland Delphi).

Архитектура интеллектуальной программной системы (рис. 4) представляет собой набор программ-мастеров (wizards), каждая из которых реа-

лизует алгоритм решения одной из задач на основе удобного и понятного (инструктивного) интерфейса пользователя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе системного анализа и комплексного подхода к моделированию динамики состояний объектов потенциальной техногенной опасности (сложных технологических комплексов) обеспечивается возможность формирования адекватного управления свойствами воздействующих факторов и свойствами объекта для повышения уровня гарантированного ресурса и снижения вероятности внезапных катастрофических отказов, нарушающих безопасную эксплуатацию объектов.

На основе структуры и функций предпроектных исследований, проектирования и конструирования сложных технологических и механических систем, методов математического моделирования, методов и подходов информационных технологий и искусственного интеллекта, принципов разработки программного обеспечения разработаны базовые положения методики исследования и обеспечения техногенной безопасности.

Разработанный программный комплекс обеспечил решение одной из задач повышения безопасности объекта при его разгерметизации [25].

ЛИТЕРАТУРА

1. Махутов Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. Ч. 2. Обоснование ресурса и безопасности. — Новосибирск: Наука, 2005. — 610 с.
2. Берман А.Ф. Дegradaция механических систем. — Новосибирск: Наука, 1998. — 320 с.
3. Берман А.Ф., Николайчук О.А. Структуризация процесса исследования безопасности сложных технических систем // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. — 1999. — № 6. — С. 3—14.
4. Берман А.Ф., Николайчук О.А. Моделирование процесса исследования безопасности сложных технических систем // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. — 1999. — № 8. — С. 185—195.
5. Берман А.Ф., Васильев С.Н. Технология обеспечения приемлемого риска аварий сложных механических систем // Проблемы человеческого риска. — 2006. — № 1. — С. 61—69.
6. Берман А.Ф., Васильев С.Н. Условия и источники техногенного риска // Проблемы человеческого риска. — 2007. — № 1. — С. 45—50.
7. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. — М.: Наука, 1978. — 157 с.
8. Берман А.Ф., Николайчук О.А. Пространство технических состояний уникальных механических систем // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2007. — № 1. — С. 14—22.
9. Буч Г. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений на C++. — М.: Бином; СПб.: Невский диалект, 1998. — 560 с.
10. Люгер Дж.Ф. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем, 4-е издание.: Пер. с англ. — М.: Вильямс, 2003. — 864 с.
11. Aamodi A., Plaza E. Case-Based reasoning: Foundational issues, methodological variations, and system approaches // AI Communications. — 1994. — Vol. 7, N 1. — P. 39—59.
12. Берман А.Ф., Николайчук О.А. Принципы создания систем исследования безопасности сложных технических систем // Программные продукты и системы. — 2001. — № 1. — С. 6—9.
13. Онтология надежности механических систем / А.Ф. Берман, О.А. Николайчук, А.И. Павлов, А.Ю. Юрин // Искусственный интеллект. — 2004. — № 3. — С. 266—271 (Украина).
14. Инструментальное средство идентификации состояний механических систем / А.Ф. Берман, О.А. Николайчук, А.И. Павлов, А.Ю. Юрин // Там же. — 2004. — № 4. — С. 268—275.
15. Интеллектуальная система поддержки принятия решений при определении причин отказов и аварий в нефтехимической промышленности / А.Ф. Берман, О.А. Николайчук, А.И. Павлов, А.Ю. Юрин // Автоматизация в промышленности. — 2006. — № 6. — С. 15—17.
16. Николайчук О.А., Юрин А.Ю. Прототип интеллектуальной системы для исследования технического состояния механических систем // Искусственный интеллект. — 2006. — № 4. — С. 459—468 (Украина).
17. Николайчук О.А., Юрин А.Ю. Управление опытом при исследовании динамики технического состояния уникальных машин и конструкций: моделирование опыта // Информационные технологии. — 2008. — № 6. — С. 30—37.
18. Берман А.Ф., Николайчук О.А., Юрин А.Ю. Обеспечение безопасности технических объектов методом прецедентных экспертных систем // Проблемы безопасности и чрезвычайные ситуации. — 2008. — № 5. — С. 83—93.
19. Николайчук О.А. Автоматизация исследований технического состояния опасных механических систем // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2008. — № 6. — С. 72—78.
20. Nikolaychuk O.A., Yurin A.Y. Computer-Aided Identification of Mechanical System's Technical State With the Aid of Case-Based Reasoning // Expert Systems With Applications. — 2008. — Vol. 34. — P. 635—642.
21. An Intelligent system for Investigation and Provision of Safety for Complex Constructions / A.F. Berman, O.A. Nikolaychuk, A.I. Pavlov, A.Y. Yurin // Intern. Journal «Information Technologies and Knowledge». — 2008. — Vol. 2. — N 3. — P. 218—225.
22. Берман А.Ф., Николайчук О.А., Юрин А.Ю. Автоматизация прогнозирования технического состояния и остаточного ресурса деталей уникальных машин и аппаратуры // Заводская лаборатория. — 2009. — № 3. — С. 48—57.
23. Павлов А.И., Юрин А.Ю. Компонентный подход: модуль правдоподобного вывода по прецедентам // Программные продукты и системы. — 2008. — № 3. — С. 55—58.
24. CLIPS: A Tool for building Expert Systems // Sourceforge.net / URL: <http://clipsrules.sourceforge.net/> (дата обновления 09.05.2008).
25. Пат. на полезную модель 81556 (РФ). Устройство для сбора утечек из оборудования, работающего под давлением, и контроля за концентрацией среды утечек / А.Ф. Берман, О.А. Николайчук // Бюлл. — 2009. — № 8.

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.В. Кульбой.

Берман Александр Фишелевич — д-р техн. наук, зав. лабораторией, ☎ 8(3952) 45-30-39, ✉ berman@icc.ru,

Николайчук Ольга Анатольевна — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, ☎ 8(3952) 45-31-52, ✉ nikoly@icc.ru,

Институт динамики систем и теории управления СО РАН, г. Иркутск.

ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ АСУТП С ПОМОЩЬЮ СИНХРОННЫХ МОДЕЛЕЙ

А.А. Сидоров, В.Е. Захарченко

Рассмотрена проблема определения достоверности параметров в системах АСУТП на основе модели объекта, функционирующей синхронно с системой управления. Предложено решение, основанное на синтезе имитационного моделирования и интервальных вычислений и применении аппарата нечетких множеств.

Ключевые слова: достоверность, синхронная модель, неисправность, параметры АСУТП, имитационная модель, нечеткая величина.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно ГОСТ [1] ко всем системам АСУТП предъявляется требование достоверности информации, поступающей в систему в реальном масштабе времени. Достоверность — это комплексное понятие [2], которое связывается с отсутствием неисправности (ошибок) источника данных, канала связи, модулей системы и т. д. Неисправность может быть как явной (выход за диапазон измерения, обрыв канала связи и др.), так и неявной, когда входные данные принадлежат области значений некоторого параметра системы, но не соответствуют действительности.

На стадии изготовления, пуска и наладки АСУТП каждый канал системы проходит метрологическую аттестацию, поверку, калибровку. В результате проведения этих процедур определяется начальный уровень достоверности каналов — для дискретных каналов он, как правило, имеет два значения $\{0, 1\}$, а для аналоговых достоверность является функцией, зависящей от погрешности. Однако в процессе эксплуатации проведение процедур проверки достоверности не всегда возможно в силу ряда причин (многие каналы принципиально нельзя откалибровать, поверить или заменить без остановки технологического процесса). Кроме того, работая в промышленном окружении, каналы и источники информации подвергаются различного рода случайным воздействиям внешней среды:

помехи, наводки, вибрации, шумы и т. д. Более того, со временем все характеристики источников и каналов информации ухудшаются [3]. Поэтому по прошествии некоторого времени с начала эксплуатации системы у экспертов возникает сомнение в правильности значений параметров. Можно ли доверять значению параметра? Как оценить достоверность расчетных параметров? При различных показаниях дублированных источников информации, какому из источников доверять? В реальных условиях ответы на эти вопросы неоднозначны. Зачастую данные проблемы может решить эксперт (обслуживающий персонал) на основе своего опыта и истории функционирования системы. Эксперт определяет основные причины, по которым значение не может быть отображено с необходимой точностью и, исследуя их, делает вывод: достоверен параметр или нет. Определить достоверность всех параметров (их число в крупных системах достигает нескольких тысяч и более) системы в реальном времени эксперт (или даже несколько экспертов) не может.

Вывод: оперативному персоналу и системам управления необходимо автоматически в реальном времени предоставлять кроме значений параметров *дополнительную информацию об их достоверности*.

Существуют немало методов для определения достоверности значений параметров системы, в основном они выдают признак: достоверен параметр по этому методу или нет. Более того, современные программно-аппаратные средства в ряде

случаев обеспечивают дополнительную информацию о достоверности (качестве) этого параметра, которую при принятии управляющих решений нельзя не учитывать. Яркими примерами таких программно-аппаратных средств служат интеллектуальные датчики с самовалидацией [3, 4], а также параметры, передаваемые в стандарте OPC (OLE for Process Control) [5]. Таким образом, со значением параметра образуется множество признаков достоверности, каждый из которых ответственен в узкой области, и на их основе сложно определить адекватность значения параметра сложившейся технологической ситуации в целом, т. е. достоверность. Особенно усложняется определение достоверности расчетных параметров.

Определение достоверности предполагает избыточность. Различают структурную, информаци-

онную и временную избыточность. Структурная избыточность предполагает резервирование, дублирование элементов системы, вследствие чего она удорожается. Информационная избыточность подразумевает наличие дополнительных связей (логических, математических, физических) в АСУТП, на основании которых можно определить достоверность исходных данных. Временная избыточность связана с необходимостью временных затрат на выполнение процедур по определению достоверности параметров [2]. Отметим, что и структурная избыточность, и информационная так или иначе нуждаются в ресурсе времени. С другой стороны, временные ограничения наиболее важные в области промышленной автоматизации, более того, они определяют специфику данной области. О достоверности можно судить, опираясь на обяза-

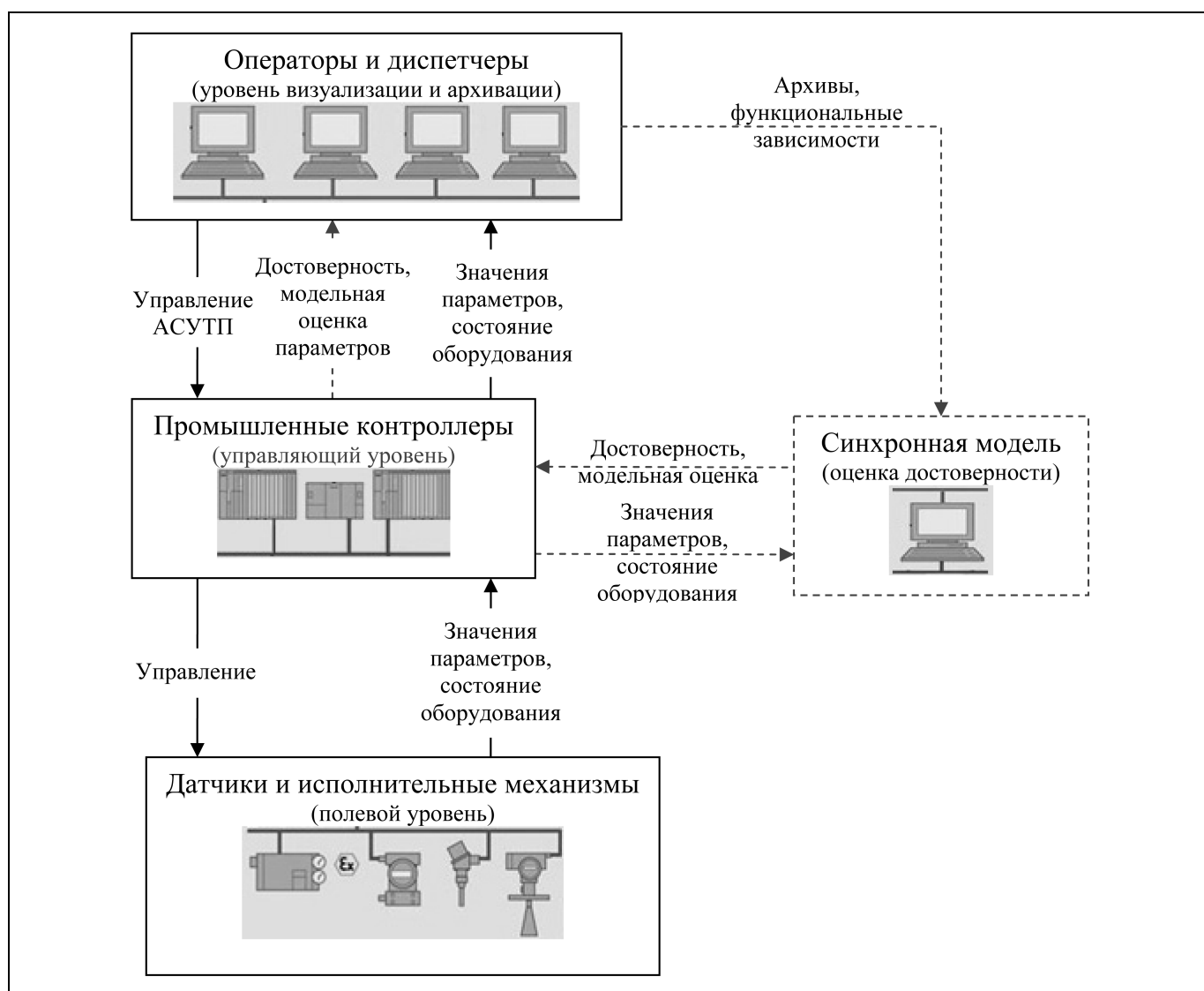


Рис. 1. Структурная схема АСУТП с синхронной моделью



тельные (в смысле непосредственного управления) знания об объекте управления, об АСУТП, о физических, математических, логических и других законах.

В представленной работе предлагается новый способ определения достоверности, который основан на применении моделей, базирующихся на опыте эксперта и исторических данных о функционировании объекта управления и называемых автором синхронными. Такой подход позволяет рассматривать параметр системно и формировать признак достоверности как оценку виртуального эксперта.

В настоящее время получила распространение структурная схема АСУТП (рис. 1), предполагающая несколько уровней: полевой, включающий в себя датчики и исполнительные механизмы, управляющий, основанный, главным образом, на программируемых логических контроллерах (ПЛК), и уровень визуализации и архивации (SCADA-систем). На управляющий уровень возложены следующие функции: собственно управление процессом (управляющие алгоритмы, функции, контроль времени, регулирование), контроль достоверности задания оператора (от SCADA-системы), контроль достоверности поступающих от объекта параметров и др. Опираясь на собственный опыт, можно отметить, что в современных системах управления решение задач определения достоверности занимает от 20 до 70 % ресурсов (объема данных, процессорного времени и т. д.). Задачи по определению достоверности параметров целесообразно переложить на отдельную модель, которая содержит необходимую базу знаний об объекте. На типовой схеме АСУТП (см. рис. 1) штриховыми линиями показаны новые элементы и потоки данных, связанные с выделением синхронной модели.

Модель для оценки достоверности параметров АСУТП должна:

- 1) работать в непрерывном режиме;
- 2) осуществлять сбор информации о текущих значениях основных параметров системы управления, оказывая минимальное влияние на быстрое действие системы управления;
- 3) функционировать в едином времени с системой управления, т. е. проверять полученные данные по критериям достоверности и осуществлять обмен данными с ней в рамках периода ее (не медленнее) обработки данных, т. е. синхронно;
- 4) осуществлять поддержку управленческих решений: выдавать системе управления признаки достоверности параметров в зависимости от ситуации, а также при неисправности, недостоверности параметра должна передавать системе управления приближенные (имитированные, модельные) значения;

5) быть масштабируемой (с возможностью добавления новых параметров);

6) быть интегрируемой, т. е. в разрабатываемой системе должны быть предусмотрены открытые интерфейсы для взаимодействия со сторонними системами;

7) обладать простым и наглядным интерфейсом, который позволял бы оператору (эксперту) при необходимости изменить (добавить, удалить, изменить) правила формирования признаков достоверности без участия разработчика.

Из перечисленных ключевым является п. 3, поэтому модель, удовлетворяющую перечисленным требованиям, далее будем именовать *синхронной*.

1. ПОСТРОЕНИЕ СИНХРОННЫХ МОДЕЛЕЙ

Как было отмечено, для определения достоверности синхронная модель призвана использовать опыт экспертов, учитывать историю функционирования АСУТП, проверять функциональные зависимости параметров. Под функциональными зависимостями понимается возможность вычисления значения одного параметра системы через другие. Таким образом, синхронная модель исключает основные источники недостоверности параметров большинства современных АСУТП.

Самое сложное при проверке достоверности — формализовать историю функционирования системы и описать функциональные зависимости. Для построения синхронной модели необходимо осуществить следующие операции:

- провести декомпозицию функционирования объекта управления на режимы;
- оценить точность по каждому параметру (метрологические данные);
- получить архивные данные поведения системы управления;
- сформировать список функциональных зависимостей по основным параметрам.

Рассмотрим эти операции более детально.

1.1. Моделирование поведения объекта на основе исторических данных

Оценка достоверности на основе исторических данных предполагает сравнение значения параметра в настоящий момент времени с аналогичными значениями в прошлом.

Эксперт разделяет весь процесс на участки, на которых параметр изменяется по некоторому стабильному легко формализуемому закону. Логично связать эти участки с технологическими режимами объекта управления. В каждом режиме предполагается поведение параметра, качественно отличное от поведения в других состояниях объекта уп-

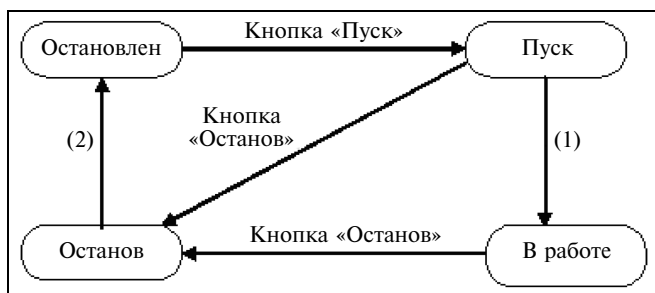


Рис. 2. Элементарная схема состояний

равления. Формально описание режимов можно выполнить в виде карты состояний (statechart, stateflow) согласно стандарту UML [6] или на основе гибридной схемы Пнуэли [7, 8]. Переход из одного режима в другой осуществляется событийно, т. е. мгновенно по выполнению некоторого условия.

Пример 1. Выделим четыре режима нормально-го функционирования объекта: остановлен, пуск, в работе, останов (рис. 2). Изначально объект остановлен, далее по нажатию кнопки «Пуск» происходит переход в режим пуска. По выполнению некоторого условия (1) происходит переход в рабочий режим. Для останова объекта требуется нажать на кнопку «Останов». Режим «Останов» завершается по некоторому условию (2). После чего осуществляется переход в остановленное состояние. Каждое из событий, по которому осуществляется смена режима, дискретное и выполняется мгновенно. ♦

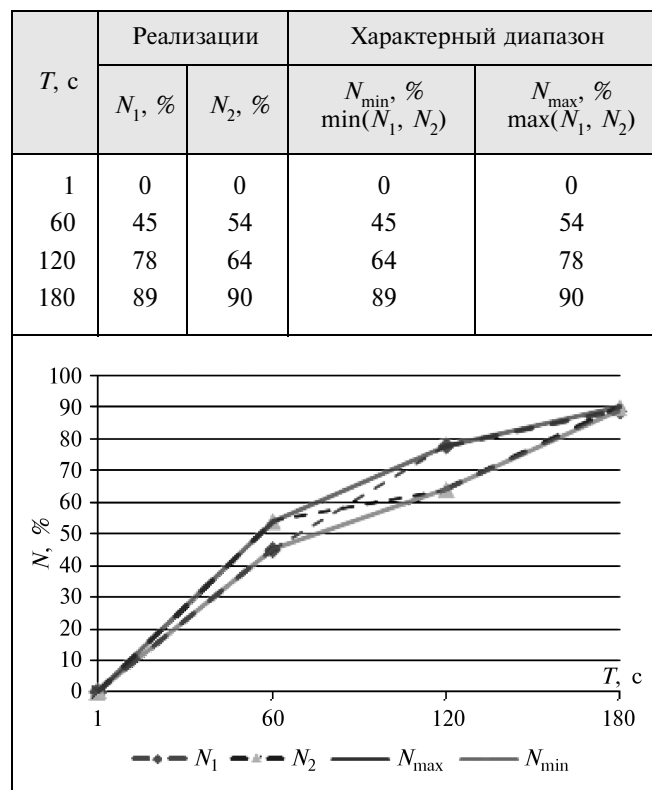
Учитывая, что число предшествующих реализаций постоянно увеличивается, удобно выделить диапазон *характерных* значений параметра в каждом из режимов, и сравнивать текущее значение параметра с границами диапазона. Иными словами, пусть имеется N реализаций некоторой технологической ситуации (режима), тогда значение параметра y в каждый момент времени можно с некоторой уверенностью заключить в интервал, определенный предыдущими реализациями $y_1, \dots, y_N$, в общем случае, с различной длительностью режима $T_1, \dots, T_N$ соответственно. Если отмерять время от начала режима $t_x \in [0, \max(T_1, \dots, T_N)]$, то значение параметра y в этот момент времени t_x предположительно будет лежать в интервале между наименьшим значением параметра из всех реализаций на данный момент времени t_x и наибольшим значением параметра по всем реализациям в тот же момент времени $y(t_x) \in [\min(y_1(t_x), \dots, y_N(t_x)), \max(y_1(t_x), \dots, y_N(t_x))]$. Объединяя наименьшие значения параметра во всех реализациях режима од-

ной функцией, а наибольшие — другой, получается такая пара функций, которая в каждый момент времени образует интервал, содержащий значения всех предшествующих реализаций параметра. Интервальная область, образованная этими функциями, в каждый момент времени определяет интервал, который будем называть *характерным диапазоном* изменения параметра. В каждом из режимов на основе данных архива системы управления (SCADA-системы) можно сформировать характерный диапазон изменения параметра.

Пример 2. Рассмотрим поведение параметра «Частота вращения гидроагрегата, N » в режиме «Пуск» на примере двух реализаций, взятых из архива АСУТП (см. таблицу). На графике функции $N_{\min}$ и $N_{\max}$ представлены в кусочно-линейном виде. В синхронной модели каждый из полученных отрезков описывается в рамках технологического режима «Пуск» путем выделения нескольких подрежимов. В данном примере число подрежимов — три, в рамках каждого подрежима характерный диапазон описывается двумя прямыми линиями (линией минимума и линией максимума).

Характерный диапазон, сформированный описанным способом, зависит от числа реализаций N : чем меньше реализаций, тем ниже уверенность в том, что $(N + 1)$ -я реализация будет принадлежать

Определение характерного диапазона параметра
«Частота вращения N гидроагрегата»





сформированной интервальной области. Очевидно, недостаток ретроспективных данных необходимо восполнить, одним из источников информации может стать эксперт технологического процесса. Эксперт на основе своего опыта и знаний определит величину, на которую следует увеличить характерный диапазон в каждом режиме. Для уменьшения числа режимов и подрежимов, а также для внесения поправок эксперта может возникнуть необходимость описания границ характерного диапазона более сложными способами, например, аппроксимацией нелинейными функциями [9, 10], с помощью нейронных сетей [11] и др.

1.2. Моделирование функциональных зависимостей

Определение достоверности параметров на основе функциональных зависимостей базируется на идее возможного вычисления значения одного параметра системы через другие с использованием формализованных закономерностей, описанных в виде функций из предметной области рассматриваемого технологического процесса. В случае отсутствия строгих равенств или сложности их определения, на производстве часто используют эмпирические зависимости. Таким образом, один параметр системы может быть определен расчетным путем через другие.

Использование функциональных зависимостей для параметров, выраженных четкими величинами, на практике затруднено, поскольку четкое представление не учитывает неточности измерений, ошибки передачи информации и оценки эксперта. Кроме того, невозможно ожидать точного совпадения рассчитанного и измеренного значений параметра. Поэтому целесообразно применять методы описания неопределенности. В настоящей работе для описания неопределенности используются интервалы [12, 13]. В реальных системах истинное значение параметра неизвестно, известна лишь его оценка с некоторой точностью, которую определяют средства измерения, каналы передачи данных, внешние воздействия, ошибки округления и вычисления и пр. Значение параметра в момент времени t можно представить интервалом

$$P_t = [p_t - a, p_t + b], \quad (1)$$

где p_t — значение параметра в настоящий момент времени, поступившее в систему управления, $a, b > 0$ — величины, характеризующие неопределенность параметра в рассматриваемый момент времени таким образом, что истинное значение параметра технологического процесса p^* непременно принадлежит интервалу $[p - a, p + b]$. Существует

немало методов оценивания величин a, b [14–19]. В общем случае величины a и b могут изменяться во времени вместе с технологическим процессом. Описание функций $a(t)$ и $b(t)$ может быть выполнено аналогично формированию диапазона характерного поведения параметра АСУТП.

Если представить значения параметров системы в момент времени t в интервальном виде (1), то можно определить расчетное значение параметра как интервал вида $P_{\text{расч}} = f(P_1, \dots, P_n) = [p_{\text{pmin}}, p_{\text{pmax}}]$, где $P_1, \dots, P_n$ — значения параметров системы управления в момент времени t , p_{pmin} и p_{pmax} — границы расчетного интервала параметра $P_{\text{расч}}$.

В общем случае для некоторых параметров P системы можно сформировать не одно, а систему интервальных равенств вида $P_{\text{расч}} = f_k(P_1, \dots, P_{nk})$, $P_{\text{расч}}$ — интервальное вычисленное значение параметра P , f_k — интервальная функция, заданная для параметра P , $1 \leq k \leq K$, K — общее число функциональных зависимостей для параметров P , $P_1, \dots, P_{nk}$ — интервальные значения параметров в рассматриваемый момент времени, nk — число параметров, от которых зависит параметр P в k -й функциональной зависимости.

Функции вида $P_{\text{расч}} = f_k(P_1, \dots, P_{nk})$ могут быть вычислены с помощью аппарата достоверных вычислений [20], интервального анализа [12, 21, 22] или недоопределенных моделей А.С. Нариньяни [13].

Предложенный подход позволяет сформировать модель объекта управления с дискретными режимами (состояниями). В каждом режиме параметры объекта управления описываются непрерывными функциями (характерным диапазоном поведения и функциональными зависимостями). Такую модель можно описать как гибридную имитационную модель [23, 24]. Она способна в реальном времени формировать для каждого параметра несколько интервальных оценок: характерный диапазон и расчетные значения по каждой функциональной зависимости во всех режимах функционирования объекта управления, на основе которых осуществляется оценка достоверности значений параметров.

2. ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ НА ОСНОВЕ СИНХРОННЫХ МОДЕЛЕЙ

Оценка достоверности формируется в результате сравнения значения p_t параметра в настоящий момент времени с границами каждой интервальной оценки этого параметра $P_{\text{хар}} = [p_{\text{min}}, p_{\text{max}}]$.

Поскольку значение параметра известно с некоторой точностью, то его следует представить в интервальном виде P_t (1). Тогда достоверность параметра P_t можно оценить мерой вхождения интервала P_t в интервал $P_{\text{хар}}$, определенной на интервале $[0, 1]$:

$$D(p_t) = \begin{cases} 0, p_t - a > p_{\max} \text{ или } p_t + b < p_{\min}, \\ 1, p_t - a > p_{\min} \text{ и } p_t + b < p_{\max}, \\ \frac{p_t + b - p_{\min}}{a + b}, p_t - a \leq p_{\min}, \\ \frac{p_{\max} - (p_t - a)}{a + b}, p_t + b \geq p_{\max}. \end{cases} \quad (1)$$

Можно заметить, что значение параметра, заданное таким образом, представляет собой нечеткую величину, полностью определенную четверкой четких чисел $\bar{p} = (p_1, p_2, p_3, p_4) = (p_{\min} - (a + b), p_{\min}, p_{\max}, p_{\max} + (a + b))$, при этом функция $D(p_t)$ является функцией принадлежности.

Пример 3. Пусть температура подпятника гидроагрегата в рабочем режиме $T_{\text{п}}$ составляет 50...60 °C и измеряется с погрешностью $a = b = 1$ °C, тогда значению температуры $T_{\text{п}} = 50,1$ °C будет соответствовать достоверность $D(T_{\text{п}} = 50,1 \text{ °C}) = 0,55$. Аналогично, $D(T_{\text{п}} = 52,0 \text{ °C}) = 1$, $D(T_{\text{п}} = 60,8 \text{ °C}) = 0,1$. ♦

Пример 4. Пусть по разным каналам в систему поступают три параметра расхода: Q с погрешностью 0,01 % и Q_1 и Q_2 с погрешностью 0,02 %, связанные функциональной зависимостью $Q_1 = Q - Q_2$, и в некоторый момент времени $Q_1 = 23 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q = 41 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q_2 = 18,5 \text{ м}^3/\text{с}$.

Далее, $Q_1 = [22,54; 23,46]$; $Q = [40,59; 41,41]$; $Q_2 = [18,13; 18,87]$, расчетное значение $Q_{1p} = [21,78; 23,28]$, таким образом, достоверность параметра Q_1 $D(Q_1) = 0,8043$. Если $Q_2 = 18,1$, то $D(Q_1) = 1$, если $Q_2 = 17$, то $D(Q_1) = 0,228$. ♦

Поскольку в общем случае для некоторых параметров P системы можно сформировать не одну, а несколько интервальных оценок $P_1, \dots, P_K$, то для каждого P_k можно определить нечеткую величину $\bar{p}_k$ с достоверностью, определяемой выражением (2), $1 \leq k \leq K$, где K — общее число интервальных оценок параметра P . Объединенную оценку достоверности можно получить на основе нечеткой арифметики несколькими способами: объединением нечетких величин, анализом минимумов и максимумов функций принадлежности и др. [11, 25–28]. Выбор способа расчета должен

опираться на требования, предъявляемые к синхронным моделям, в число которых входит требование максимально быстрого расчета оценки достоверности. Кроме того, способ должен отвечать особенностям технологического процесса, а также основываться на знаниях эксперта. В этой связи для расчета объединенной оценки достоверности предлагается простой в вычислительном плане способ, а именно — расчет линейной комбинации нечетких величин:

$$\bar{p} = \sum_{k=1}^K \gamma_k \bar{p}_k,$$

где $\bar{p}_k$ — нечеткая величина, характеризующая достоверность параметра P по k -й интервальной оценке, $\gamma_k \in [0, 1]$ — весовые коэффициенты ($\sum \gamma_k = 1$), задаваемые экспертом исходя из анализа приоритетов интервальных оценок. Если все зависимости эквивалентны (имеют равный приоритет), то $\bar{p} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \bar{p}_k$ и для нечетких величин справедлива запись:

$$\bar{p} = (p_1, p_2, p_3, p_4) = \left(\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K p_{1k}, \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K p_{2k}, \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K p_{3k}, \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K p_{4k} \right).$$

Для интерпретации результата введем две величины: порог доверия d_{trust} и порог сомнения d_{doubt} такие, что $d_{\text{trust}}, d_{\text{doubt}} \in [0, 1]$ и $d_{\text{trust}} < d_{\text{doubt}}$. Если $D(p_t) \geq d_{\text{trust}}$, параметр p_t достоверен в момент времени t , если $D(p_t) < d_{\text{doubt}}$, параметр p_t — не достоверен, в остальных случаях значение параметра p_t сомнительно, т. е. значение параметра не удовлетворяет одному или нескольким критериям.

На основе оценки достоверности, полученной по приведенной методике, возможно формирование модельного значения. В случае отказа источника данных или канала система управления может ориентироваться на модельное значение, вычисляемое как нечеткое среднее общей оценки достоверности. Для нечетких величин [11] вида $\bar{p} = (p_1, p_2, p_3, p_4)$ нечеткое среднее можно рассчитать по формуле $p_m = \frac{1}{4} (p_1 + p_2 + p_3 + p_4)/4$.

Модельное значение параметра может участвовать в алгоритмах управления, как минимум, для безаварийной приостановки технологического процесса.

3. ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ СИНХРОННОЙ МОДЕЛИ

Рабочий цикл состоит из следующих этапов:

- синхронная модель получает текущие значения параметров системы управления;
- в зависимости от полученных значений вычисляются текущие интервальные оценки;
- в соответствии с изложенными алгоритмами формируются достоверность и модельное значение каждого параметра в текущий момент времени;
- синхронная модель передает оценки достоверности и модельные значения параметров в систему управления.

Предлагаемые алгоритмы расчета достоверности не требуют большой производительности вычислительных устройств и могут быть применены

в режиме реального времени совместно с системой управления.

На основе полученной от синхронной модели информации система управления формирует сигналы управления и готовит информацию для визуализации и архивации. На экране оператора полученный результат можно выделить цветом: параметр достоверен или не достоверен. Модельное значение параметра рекомендуется выделить ярким цветом, это позволит оператору визуально определить область неисправности и принять меры по ее устранению.

Опыт реализации синхронной модели. Предлагаемая методика апробирована на АСУТП гидроагрегата Жигулевской ГЭС. Упрощенная схема состояний гидроагрегата представлена на рис. 3. Система контроля достоверности на основе синхронных моделей в реальном времени следит за 24 основными параметрами системы управления, учитывает историю процесса и анализирует 6 функциональных зависимостей. Система построена с использованием среды имитационного моделирования «AnyLogic» (<http://www.xjtek.com/>). Среда исполнения «AnyLogic» использует кроссплатформенный язык программирования Java и позволяет подключать динамические библиотеки. С помощью этого механизма осуществлена интеграция системы управления и синхронной модели, реализованы операции над нечеткими и интервальными величинами, а также функции оценки достоверности параметров. При этом рабочий цикл синхронной модели не превышает цикл обработки входных данных контроллером (150 мс).

После введения автоматической системы контроля достоверности параметров на основе синхронных моделей число ложных срабатываний системы управления сократилось на 60 %.

Для реализации синхронной модели применение специализированного пакета моделирования, в частности «AnyLogic», не обязательно, его функции можно реализовать и на базе ПК, и в среде ПЛК, но пакет «AnyLogic» позволил наглядно представить схему режимов и описать взаимодействие параметров стандартными средствами с минимальными трудозатратами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализация синхронной модели в рамках АСУТП позволяет:

- уменьшить число ложных срабатываний АСУТП благодаря принятию решений на основе проверенных, достоверных данных и, как следствие, снизить время простоя оборудования;

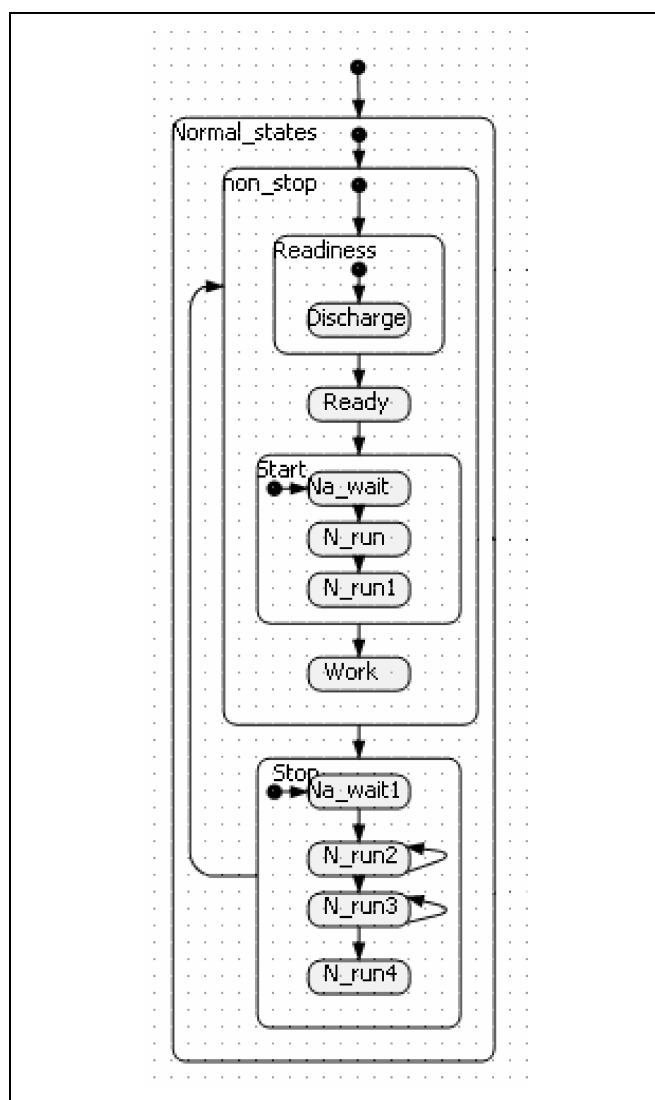


Рис. 3. Схема состояний гидроагрегата

- усилить контроль исправности оборудования, что позволит раньше находить неисправности и устранить их;
- при недостоверности значения параметра АСУТП воспользоваться его модельной оценкой;
- при дублировании автоматически определить исправный, достоверный источник информации без помощи оперативного персонала и осуществлять управление на основе корректных (достоверных) данных.

Кроме того, реализация синхронной модели предоставляет следующие возможности:

- автоматическое прогнозирование поведения параметра в заданном режиме;
- проверка алгоритмов управления без объекта управления;
- обучение персонала на основе модельных значений.

Итак, предлагаемое решение на основе синхронных моделей обладает низкой вычислительной сложностью, основывается на ретроспективных данных и на опыте экспертов технологического процесса, что позволяет оценивать достоверность параметров в реальном времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. *ГОСТ 34.603—92*. Информационная технология. Виды испытаний автоматизированных систем. — М.: Изд-во стандартов, 1992.
2. *Кульба В.В., Ковалевский С.С., Шелков А.Б.* Достоверность и сохранность данных в АСУ. — М.: СИНТЕГ, 2003. — 500 с.
3. *Пронин А.Н., Сапожникова К.В., Тайманов Р.Е.* Контроль достоверности информации, поступающей от датчиков // Датчики и системы. — 2008. — № 8. — С. 58—63.
4. *POLARCOM* Проект SEVA (SEnsor VALidation — самоконтроль датчиков) // Автоматика и робототехника. — 2000. URL: http://www.polarcom.ru/~vvtsv/ref2000/r017_2.htm (дата обращения: 10.09.2009).
5. *Industry Standard Specification OPC Overview / OPC Foundation*. — 1998. — 16 p.
6. *Booch G., Jacobson I., Rumbaugh J.* The Unified Modeling Language for Object-Oriented Development / Documentation Set Version 1.1. — 1997. — 35 p.
7. *Harel D.* Statecharts: A Visual Formalism for Complex Systems // Science of Computer Programming. — 1987. — Vol. 8, N 3. — P. 231—274.
8. *Парийская Е.Ю.* Сравнительный анализ математических моделей и подходов к моделированию непрерывно-дискретных систем // Дифференциальные уравнения и процессы управления. Электронный журнал. — 1997. — № 1. — С. 91—120.
9. *Захарченко В.Е.* Имитационная модель гидроагрегата для тестирования алгоритмов АСУТП // Автоматизация в промышленности. — 2007. — № 7. — С. 37—40.
10. *Захарченко В.Е.* Контроль достоверности параметров АСУТП // Автоматизация в промышленности. — 2008. — № 7. — С. 37—40.
11. *Лю Б.* Теория и практика неопределенного программирования. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. — 416 с.
12. *Шокин И.Ю.* Интервальный анализ. — М.: Наука, 1981. — 112 с.
13. *Нариньяни А.С.* Недоопределенные модели и операции с недоопределенными значениями. — Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1982. — 33 с.
14. *Сквайрс Дж.* Практическая физика. — М.: Мир, 1971. — 246 с.
15. *Кудряшова Ж.Ф., Рабинович С.Г., Резник К.А.* Методы обработки результатов наблюдений при измерениях // Тр. метрологич. ин-тов СССР. — М. — Л.: Изд-во стандартов, 1972. — Вып. 134 (194).
16. *Бурдун Г.Д., Марков Б.Н.* Основы метрологии. — М.: Изд-во стандартов, 1975. — 335 с.
17. *Тюрин Н.И.* Введение в метрологию. — М.: Изд-во стандартов, 1976. — 210 с.
18. *Соловьев В.А., Яхонтова В.Е.* Элементарные методы обработки результатов измерений. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1977. — 72 с.
19. *Новицкий П.В., Зограф И.А.* Оценка погрешности результатов измерений. — Л.: Энергоатомиздат, 1991. — 304 с.
20. *Достоверные вычисления. Базовые численные методы / Кулиш У. и др.* — М. — Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005. — 496 с.
21. *Moore R.E.* Automatic local coordinate transformation to reduce the growth of error bounds in interval computation of solutions of ordinary differential equations / Error in Digital Computation. — New York: John Wiley and Sons, Inc, 1965. — Vol. 1. — P. 61—130.
22. *Шарый С.П.* Конечномерный интервальный анализ / Интервальный анализ и его приложения. — Новосибирск: Институт вычислительных технологий СО РАН. URL: <http://www.sbras.ru/interval/Library/InteBooks/Shary/SharyBook.pdf> (дата обращения: 09.2008).
23. *Карнов Ю.Г.* Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5. — СПб.: БХВ-Петербург, 2006. — 400 с.
24. *Форрестер Дж.* Мировая динамика. — М.: Наука, 1978. — 340 с.
25. *Заде Л.* Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решения / Математика сегодня: Сб. ст. — М.: Знание, 1974. — С. 5—49.
26. *Заде Л.* Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. — М.: Мир, 1976. — С. 165.
27. *Sakawa M., Nishizaki I., Uemura Y.* Interactive fuzzy programming for multi-level linear programming problems with fuzzy parameters // Fuzzy Sets And Systems. — 2000. — Vol. 9. — P. 3—19.
28. *Zimmerman H.J.* Fuzzy Set Theory and its Applications. — Kluwer, etc : World Scientific, 1992. — 435 p.

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.А. Амбарцумяном.

Сидоров Андрей Анатольевич — канд. техн. наук, директор по развитию, ☎/✉ +7 (846) 933-03-50, ✉ ac@sms-samara.ru,

Захарченко Виталий Евгеньевич — вед. инженер, ☎/✉ +7 (846) 269-15-20, доб. 131, ✉ zevs@sms-samara.ru,

ООО НВФ «Сенсоры. Модули. Системы», г. Самара.

АЛГОРИТМЫ БЫСТРОГО ОЦЕНИВАНИЯ ВЕКТОРА ВЫСОКОЙ РАЗМЕРНОСТИ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

А.Я. Андриенко, Е.И. Тропова

Рассмотрена задача планирования программного управления подвижным объектом в условиях дефицита и априорной неопределенности времени, выделяемого на это планирование. Предложены алгоритмы быстрого оценивания векторов параметров высокой размерности.

Ключевые слова: вектор возмущений высокой размерности, алгоритм быстрого оценивания, дефицит времени оценивания.

ВВЕДЕНИЕ

В статье излагаются результаты развития метода оценивания векторов возмущений высокой размерности [1], разработанного в обеспечение анализа результатов летных испытаний бортовых систем управления. Необходимость такого развития связывается с созданием автоматизированных систем оперативного планирования полета объектов авиационной и ракетной техники [2]. Становится актуальной задача быстрого оценивания вектора параметров высокой размерности, принципы и алгоритмы решения которой представлены в § 2 и 3 статьи.

1. ЗАДАЧА БЫСТРОГО ОЦЕНИВАНИЯ ВЕКТОРА ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОЙ РАЗМЕРНОСТИ

Специфику требований, предъявляемых к представляемому алгоритму оценивания, поясним на содержательном примере автоматизированной прокладки маршрута полета, выполняемой в ряде перспективных систем управления типа бортовой системы управления полетом самолета тактической авиации, наземной системы подготовки полетных заданий для вылета авиасоединения и пр.

Прокладка маршрута x^* — это выбор трассы, профиля и временного графика полета самолета от аэродрома к цели, проводимый по скалярному критерию J , учитывающему вероятности поражения самолета средствами ПВО, потери про-

странственной ориентировки и столкновения с наземными объектами. Для расчета критерия J используются специальные математические модели (модель ПВО в виде зависимости интенсивности поражения самолета от фазовых координат относительного положения самолета и средств ПВО; модель навигационного риска в виде функциональной зависимости вероятности потери самолетом пространственной ориентировки от информативности навигационного поля; модель риска столкновения с поверхностью Земли, связывающая вероятность гибели самолета с высотой полета и рельефом местности), позволяющие каждому возможному маршруту x ставить в соответствие численное значение критерия J :

$$J = \Psi(x), \quad x \in X, \quad (1)$$

где X — множество всех возможных маршрутов полета, прокладываемых по имеющейся в системе информации.

Процессу прокладки маршрута предшествует этап сбора и введения в ПЭВМ оперативно-разведывательной, картографической, метеорологической и другой информации, касающейся параметров упомянутых моделей, а также этап автоматизированного формирования множества $\{X^k\}$ магистральных маршрутов X^k , $k = 1, 2, \dots, K$, полета, в окрестностях Ω^k , $k = 1, 2, \dots, K$, которых лежит искомый маршрут. (Размеры объединения $\Omega = \bigcup \Omega^k$ заведомо меньше размеров множества X .)

Маршруты $x \in \Omega^k$, $k = 1, 2, \dots, K$, подлежат параметризации: $x = x(\mathbf{V})$, где $\mathbf{V}$ — N -мерный вектор параметров, характеризующий координаты точек поворота маршрута и коэффициенты полиномиальных аппроксимаций траекторий и временного графика полета на участках между точками поворота.

В дальнейшем полагаем, что границы $\mathbf{B}^k = (B^{k(1)}, B^{k(2)}, \dots, B^{k(N)})$ окрестностей Ω^k , $k = 1, 2, \dots, K$, магистральных маршрутов $X^k = X^k(\mathbf{V}^k)$, где $\mathbf{V}^k = (V^{k(1)}, V^{k(2)}, \dots, V^{k(N)})$, представимы в виде $B^{k(n)} = V^{k(n)} \pm \Delta^{(n)}$, $n = 1, 2, \dots, N$, где $\Delta^{(n)}$ — заданные числа, характеризующие размеры окрестности Ω^k .

Тогда выбор маршрута x^* сводится к решению задач оценивания параметров $\mathbf{V}$ оптимального маршрута в окрестностях Ω^k из условия

$$\hat{\mathbf{V}}^k = \arg \min_{\mathbf{V} \in \Omega^k} \Psi[x(\mathbf{V})] = \arg \min_{\mathbf{V} \in \Omega^k} \psi(\mathbf{V}) \quad (2)$$

с последующим определением наилучшей (по критерию (1)) из оценок $\hat{\mathbf{V}}^k$, $k = 1, 2, \dots, K$.

Задача (2) значительно труднее рассмотренной в работе [1] по двум причинам.

Прежде всего, критерий оптимальности ψ в задаче (2) по природе зависимости безопасности полета $R = 1 - \psi(\mathbf{V})$ от маршрута представляет собой очень сложную многоэкстремальную функцию вектора параметров $\mathbf{V}$.

Далее, располагаемое для решения задачи (2) время априори не определено: для прокладки маршрута одной и той же системе может быть выделено от минут до нескольких часов (а наземной системе подготовки полетных заданий — и до нескольких суток) в зависимости от складывающейся оперативной обстановки.

2. ПРИНЦИПЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Целесообразно так развить корреляционный метод [1], чтобы он позволял формировать оценки вектора высокой размерности в условиях многоэкстремальности задач типа (2) и в условиях дефицита времени, выделяемого на решение задачи, при априори неизвестной степени его дефицитности.

Такое развитие может быть получено на основе использования двух идей.

1. Решение многоэкстремальной задачи (2) определим как предел $\hat{\mathbf{V}}^k = \lim_{q \rightarrow \infty} \hat{\mathbf{V}}_q^k$, последо-

вательности решений задач (индекс k в дальнейшем опускается):

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{V}}_q &= \hat{\mathbf{V}}_{q-1} + \Delta \hat{\mathbf{V}}_q, \\ \Delta \hat{\mathbf{V}}_q &= \arg \min_{\Delta \mathbf{V}_q} M\{\psi(\hat{\mathbf{V}}_{q-1} + \Delta \mathbf{V}_q + \mathbf{v}_q)\}, \\ q &= 1, 2, \dots, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\mathbf{v}_q$ — N -мерный случайный вектор с независимыми между собой компонентами, среднеквадратические значения которых линейно связаны с компонентами вектора $\Delta \hat{\mathbf{V}}_{q-1}$ так, что $|\mathbf{v}_q| \rightarrow 0$ при $q \rightarrow \infty$.

Критерии оптимальности в задачах (3) значительно глаже функции $\psi(\mathbf{V})$ и могут быть аппроксимированы унимодальными зависимостями (по аргументам $\Delta \mathbf{V}_q$) с тем, чтобы для решения задач (3) можно было использовать итерационным образом метод [1]. Но это, естественно, можно сделать лишь в случаях достаточно большого времени, располагаемого для решения всей оптимизационной задачи.

2. Процесс решения задачи организуем таким образом, чтобы при прерывании его в произвольный момент времени можно было представить некоторую промежуточную оценку вектора (с лучшей, естественно, погрешностью, чем ошибка завершенного решения задачи).

Эта промежуточная оценка должна быть в некотором смысле (см. § 3) наилучшей из всех оценок, которые можно было бы сформировать к текущему моменту времени решения задачи.

3. АЛГОРИТМЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Основные пояснения принципов построения и действия разработанных алгоритмов оценивания вектора $\mathbf{V}$ высокой размерности проведем применительно к условиям задачи управления по критерию безопасности (алгоритм 1) с последующими уточнениями при приложении к задаче прогнозирования конечного состояния терминальной системы (алгоритм 2).

Алгоритм 1. При действии алгоритма реализуется итерационный процесс (3) оценивания вектора $\mathbf{V}$.

В начале q -го цикла работы алгоритма (на шаге 1) считаются известными значения предшествующих оценок $\hat{\mathbf{V}}_{q-1}$ и $\Delta \hat{\mathbf{V}}_{q-1}$ при $q > 1$, а также априорные значения $\hat{\mathbf{V}}_0 = \mathbf{V}^k$ вектора параметров магистрального маршрута и числа $\Delta^{(n)}$, $n = 1, 2, \dots, N$, характеризующие размеры окрестности магистрального маршрута; на любом шаге итерационного процес-



са может поступить внешняя команда — запрос $\chi = 1$ на выдачу оценки $\hat{\mathbf{V}}$ вектора $\mathbf{V}$.

В каждом из последующих шагов итерационного цикла формируется s -е ($s = v - 1$, v — номер шага) значение $\mathbf{v}_{qs} = (v_{qs}^{(1)}, v_{qs}^{(2)}, \dots, v_{qs}^{(N)})$ вектора $\mathbf{v}_q$ и вычисляется соответствующее значение критерия $\psi(\hat{\mathbf{V}}_{q-1} + \mathbf{v}_{qs})$. Если бы заранее было известно, что сигнал χ поступит не ранее $(3N + 1)$ -го шага q -го цикла итерации, то для определения оценки $\hat{\mathbf{V}}_q$ можно было бы непосредственно применить метод [3], предусматривающий формирование ортогональных векторов $\mathbf{v}_{qs}$, $s = 1, 2, \dots, N$, на основе матрицы Адамара A размера $N \times N$. Набор $\{\mathbf{v}_{qs}\}$ полученных при этом N векторов $\mathbf{v}_{qs}$ предельно равномерно заполняет задаваемую в окрестности $\hat{\mathbf{V}}_{q-1}$ область Ω_q возможных значений вектора $\mathbf{v}_q$. Поясним это обстоятельство несколько детальнее.

Считается, что область Ω_q определяется заданием среднеквадратических значений $\sigma_q^{(n)}$ составляющих $v_q^{(n)}$, $n = 1, 2, \dots, N$, вектора $\mathbf{v}_q$ (см. шаг 2) и условием некоррелированности этих составляющих. Набор векторов $\mathbf{v}_{qs}$, $s = 1, 2, \dots, N$, однозначно определяется матрицей Z чисел (индекс q здесь опускается), каждая s -я строка которой составлена из нормированных и безразмерных составляющих $z_{sn} = v_{qs}^{(n)} / \sigma_q^{(n)}$ вектора $\mathbf{v}_{qs}$. Равномерность заполнения области Ω_q векторами $\mathbf{v}_{qs}$ характеризуется разбросом расстояний $r_{s_1 s_2}$ между вектор-строками и расстояний $\rho_{n_1 n_2}$ между вектор-столбцами матрицы Z , где

$$r_{s_1 s_2} = \sum_{n=1}^N (z_{s_1 n} - z_{s_2 n})^2, \quad \rho_{n_1 n_2} = \sum_{s=1}^S (z_{s n_1} - z_{s n_2})^2$$

(в общем случае $S \leq N$; s_1, s_2, n_1, n_2 — произвольные номера строк и столбцов).

В методе [3] принимается $Z = A$, и тогда в силу ортогональности матрицы A по строкам и столбцам все расстояния $r_{s_1 s_2}$ между любыми вектор-строками и $\rho_{n_1 n_2}$ между любыми вектор-столбцами одинаковы, т. е. сформированные N векторов $\mathbf{v}_{qs}$ распределены в N -мерной области Ω_q предельно равномерно. Поэтому в случае, если сигнал χ поступит несколько раньше $(N - 1)$ -го шага q -й итерации, то в качестве оценки вектора $\mathbf{V}$ на шаге v правомерно будет принимать тот элемент ряда $\mathbf{V}_{q-1}, \mathbf{V}_{q-1} + \mathbf{v}_{q1}, \mathbf{V}_{q-1} + \mathbf{v}_{q2}, \dots, \mathbf{V}_{q-1} + \mathbf{v}_{q(v-1)}$, который доставляет минимум функции $\psi(\cdot)$.

Если же сигнал χ поступает на одном из начальных шагов (шаге v) q -й итерации, то реализуется лишь относительно небольшой фрагмент набора $\{\mathbf{v}_{qs}\}$, составленный из векторов $\mathbf{v}_{qs}$, $s = 1, 2, \dots, S$, где $S = v - 1$. Эти векторы в общем случае весьма неравномерно распределены в области Ω_{q-1} , о чем свидетельствует разброс расстояний $\rho_{n_1 n_2}$ между вектор-столбцами верхнего блока (размера $S \times N$) матрицы A .

Поэтому при формировании матрицы Z целесообразно учесть дополнительное требование, направленное на повышение равномерности распределения начального фрагмента (длиной $S = v - 1$) набора векторов $\{\mathbf{v}_{qs}\}$ и формализуемое условием

$$\min_{n_1 n_2} \left\{ \sum_{s=1}^S (z_{s n_1} - z_{s n_2})^2 \right\} \rightarrow \max,$$

которое при $Z = A$, $|z_{sn}| = 1$ эквивалентно условию

$$\min_{n_1 n_2} \left\{ \sum_{s=1}^S |z_{s n_1} - z_{s n_2}| \right\} \rightarrow \max. \quad (4)$$

Рассматривая $z_{1n}, z_{2n}, \dots, z_{Sn}$ как S -разрядный набор из -1 и $+1$, воспользуемся принятым в теории кодов понятием расстояния между двумя наборами, определяемого как число разрядов, в которых эти наборы различаются. Тогда условие (4) аналогично требованиям, предъявляемым к расстоянию между сообщениями в оптимальных кодах. Математический аппарат преобразования матриц A для выполнения этих требований представлен в работе [4].

При назначении в условии (4) числа S , когда время поступления сигнала χ априори не известно, следует исходить из стремления обеспечить равномерность распределения $\mathbf{v}_q$ на возможно более ранних этапах работы алгоритма, т. е. определять S как минимальное число, при котором задача (4) имеет решение. В представляемой далее формализации алгоритма, как и в работе [5], принимается $S = [\sqrt{N}]^*$, где $[\cdot]^*$ — целая часть числа.

Шаг 1 q -го цикла.

1. В качестве наилучшей на шаге принимается оценка $\hat{\mathbf{V}}_{q0} = \hat{\mathbf{V}}_{q-1}$ и вычисляется соответствующее ей значение критерия $J_{q0} = \psi(\hat{\mathbf{V}}_{q0})$.

2. Если $\chi = 1$, то $\hat{\mathbf{V}} = \hat{\mathbf{V}}_{q0}$, конец; если $\chi = 0$, то переход к следующему шагу.

Шаг 2 q -го цикла.

1. Для $q = 1$ устанавливается $\sigma_q^{(n)} = \Delta^{(n)} / \sqrt{3}$; для $q > 1$

$$\sigma_q^{(n)} = |\Delta \hat{V}_{q-1}^{(n)}|, \quad n = 1, 2, \dots, N^*.$$

2. Формируется возмущение v_{q1} с координатами

$$v_{q1}^{(n)} = \sigma_q^{(n)} \vartheta_{1d} \lambda_{1g}, \quad n = 1, 2, \dots, N,$$

где $d = n + 1 + S[n/S]^*$, $g = [n/S]^* + 1$; ϑ_{1d} и λ_{1g} — элементы образуемых в соответствии с работой [4] матриц Адамара Θ и Λ .

3. Вычисляется значение критерия $J_{q1} = \psi(\hat{V}_{q1})$,

где $\hat{V}_{q1} = \hat{V}_{q-1} + v_{q1}$, и устанавливаются начальные значения кумулятивных сумм

$$\psi_{q1}^{(n)} = J_{q1} v_{q1}^{(n)}, \quad n = 1, 2, \dots, N.$$

4. Определяется наилучшая на шаге оценка

$$\hat{V}_{q1} := \begin{cases} \hat{V}_{q0}, & \text{если } J_{q0} \leq J_{q1}, \\ \hat{V}_{q1}, & \text{если } J_{q0} > J_{q1} \end{cases}$$

и соответствующее ей значение критерия

$$J_{q1} := \begin{cases} J_{q0}, & \text{если } J_{q0} \leq J_{q1}, \\ J_{q1}, & \text{если } J_{q0} > J_{q1}. \end{cases}$$

5. Если $\chi = 1$, то $\hat{V} = \hat{V}_{q1}$, конец; если $\chi = 0$, то переход к следующему шагу.

Замечание 1. Величина $\sigma_1^{(n)}$, $n = 1, 2, \dots, N$ в операции 1 шага 2 назначается в предположении равномерности априорного распределения вероятностей величин $v_1^{(n)}$ в интервале $(-\Delta^{(n)}, +\Delta^{(n)})$. ♦

Шаг ν ($\nu = 3, 4, \dots, 3N + 1$) q -го цикла.

1. Формируется возмущение v_{qs} ($s = \nu - 1$) с координатами:

а) при $\nu = 3, 4, \dots, N + 1$

$$v_{qs}^{(n)} = \sigma_{qs}^{(n)} \vartheta_{td} \lambda_{tg} \lambda_{pg},$$

где $t = s - S[(s - 1)/S]^*$, $p = [(s - 1)/S]^* + 1$; значения d и g указаны в шаге 2;

б) при $\nu = N + 2, N + 3, \dots, 2N + 1$

$$v_{qs}^{(n)} = \begin{cases} \sigma_q^{(n)}, & \text{если } s - (N + 1) = n, \\ 0, & \text{если } s - (N + 1) \neq n; \end{cases}$$

в) при $\nu = 2N + 2, 2N + 3, \dots, 3N + 1$

$$v_{qs}^{(n)} = \begin{cases} -\sigma_q^{(n)}, & \text{если } s - (2N + 1) = n, \\ 0, & \text{если } s - (2N + 1) \neq n. \end{cases}$$

2. Вычисляется значение критерия $J_{qs} = \psi(\hat{V}_{qs})$,

$$\hat{V}_{qs} = \hat{V}_{q-1} + v_{qs}.$$

а) при $\nu = 3, 4, \dots, N + 1$ вычисляются значения кумулятивных сумм

$$\psi_{qs}^{(n)} = \psi_{q(s-1)}^{(n)} = J_{qs} v_{qs}^{(n)}, \quad n = 1, 2, \dots, N;$$

б) при $\nu = N + 2, N + 3, \dots, 2N + 1$ формируется для $n = s - (N + 1)$ величина $l^{(n)} = J_{qs}$ ($s = \nu - 1$);

в) при $\nu = 2N + 2, 2N + 3, \dots, 3N + 1$ формируется для $n = s - (2N + 1)$ величина $m^{(n)} = J_{qs}$ ($s = \nu - 1$).

3. Определяется наилучшая на шаге оценка

$$\hat{V}_{q1} := \begin{cases} \hat{V}_{q(s-1)}, & \text{если } J_{q(s-1)} \leq J_{qs}, \\ \hat{V}_{qs}, & \text{если } J_{q(s-1)} > J_{qs} \end{cases}$$

и соответствующее ей значение критерия

$$J_{qs} := \begin{cases} J_{q(s-1)}, & \text{если } J_{q(s-1)} \leq J_{qs}, \\ J_{qs}, & \text{если } J_{q(s-1)} > J_{qs}. \end{cases}$$

4. Если $\chi = 1$, то $\hat{V} = \hat{V}_{qs}$, конец;

если $\chi = 0$, $q > 1$, $\nu = N + 1$, то переход к шагу $3N + 1$,

в других случаях — переход к следующему шагу.

Замечание 2. Как следует из условий операции 4 шага ν , выполнение шагов $N + 2, N + 3, \dots, 3N + 1$ и формирование величин $l^{(n)}$ и $m^{(n)}$ производятся только в первом цикле итераций (при $q = 1$); в остальных циклах число шагов не превышает $N + 2$.

Шаг $3N + 2$ q -го цикла.

1. Определяется наилучшая в цикле оценка $\hat{V}_q$

с координатами $\hat{V}_q^{(n)} = \hat{V}_{q-1}^{(n)} + \Delta \hat{V}_q^{(n)}$, $n = 1, 2, N$, где

$$\Delta \hat{V}_q^{(n)} = \frac{\psi_{qN}^{(n)}}{N(2J_{q0} - l^{(n)} - m^{(n)} - \beta)}, \quad n = 1, 2, N;$$

здесь параметр β априори выбирается, как и в работе [3], из условия, чтобы оценки вектора $\hat{V}$ не выходили за пределы области Ω^k .

2. Если $\chi = 1$, то $\hat{V} = \hat{V}_q$, конец;

если $\chi = 0$, то переход к $(q + 1)$ -му циклу итерации. ■

Здесь изложен алгоритм решения только одной из однотипных задач (индекс k в данном разделе опущен), составляющих общую задачу прокладки маршрута по критерию безопасности R . Порядок объединения алгоритмов параллельного решения K задач в единый очевиден и не требует пояснений.

Представленный алгоритм реализует, вообще говоря, процедуру приближенного решения поставленной задачи: для сходимости последовательности (3) к глобальному экстремуму (2) необходимо выполнение довольно жестких условий, накладываемых на коэффициенты связи вероятностных характеристик вектора v_q с вектором $\Delta \hat{V}_q$. Эти условия в статье не рассматриваются. Данный же вариант алгоритма в практических приложениях



обеспечивает поиск всего лишь локального экстремума задачи, но вблизи глобального экстремума сглаженного исходного критерия.

Область возможных применений изложенного подхода заведомо шире класса задач управления по критерию безопасности R . В частности, при терминальном управлении некоторыми технологическими процессами в химической и фармакологической отраслях промышленности интервалы времени между моментами i проведения коррекций процесса оказываются меньшими времени, потребного для формирования оптимальных управляющих команд. Применительно к таким случаям алгоритм модифицируется следующим образом.

Алгоритм 2. Прежде всего, номер цикла итерации здесь жестко привязывается к номеру интервала квантования дискретной терминальной системы: $q = i$ (соответствующим образом должно быть перестроено условие перехода от цикла к циклу).

Далее, для терминальных систем априори известно число S_i шагов, выполняемых в цикле итерации, т. е. размещаемых в интервале между дискретными моментами времени i и $i + 1$ (поэтому условие (4) здесь должно соблюдаться для числа S_i , а

не для минимально возможного числа $S = [\sqrt{N}]^*$).

Кроме того, задачи терминального управления в исходной постановке чаще всего оказываются статистическими, и поэтому здесь с увеличением номера итерации среднеквадратическое значение $\sigma_q^{(n)}$ возмущений $v_q^{(n)}$, $n = 1, 2, \dots, N$, должно приближаться не к нулю, а к условному среднеквадратическому значению ошибки оптимального оценивания координаты $V^{(n)}$ вектора V .

Соответствующие уточнения в алгоритме очевидны.

И наконец, в зависимости от размерности решаемых задач алгоритм перестраивается посредством формирования матриц Θ и Λ из множества возможных матриц Адамара. ■

Пример. Ограничимся представлением примера матриц Θ и Λ , сформированных в соответствии с работой [4], для использования при оптимизации N -мерного вектора параметров маршрута полета применительно к случаю $N = 64$.

Матрица Θ

```

+1 +1 +1 +1 +1 +1 +1 +1
+1 +1 -1 -1 -1 +1 -1 +1
+1 +1 -1 +1 +1 -1 -1 -1
+1 -1 -1 +1 -1 +1 +1 -1
+1 +1 +1 -1 -1 -1 +1 -1
+1 -1 +1 +1 -1 -1 -1 +1
+1 -1 -1 -1 +1 -1 +1 +1
+1 -1 +1 -1 +1 +1 -1 -1

```

Матрица Λ

```

+1 +1 +1 +1 +1 +1 +1 +1
+1 -1 +1 -1 +1 -1 +1 -1
+1 +1 -1 -1 +1 +1 -1 -1
+1 -1 -1 +1 +1 -1 -1 +1
+1 +1 +1 +1 -1 -1 -1 -1
+1 -1 +1 -1 -1 +1 -1 +1
+1 +1 -1 -1 -1 -1 +1 +1
+1 -1 -1 +1 -1 +1 +1 -1

```

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена процедура оценивания вектора высокой размерности, объединяющая ранее разработанный корреляционный метод поиска глобального экстремума в пространстве возмущений с методом формирования максимально различных между собой вариантов вектора возмущений. При остром дефиците времени решения задачи предложенная процедура приводит к алгоритму выбора наилучшего из просмотренных вариантов оцениваемого вектора, а при увеличении располагаемого времени решения она трансформируется в алгоритм корреляционного поиска наилучшего из всех возможных вариантов оценки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андриенко А.Я., Тропова Е.И., Чадаев А.И. Методы анализа результатов летных испытаний бортовых систем управления // Автоматика и телемеханика. — 2010. — № 5. — С. 155—165.
2. Maroon G.N., Duong N.G., Maschec T.J. Tactical flight management — total mission capability // Proc. IEEE Nat. Aerosp. and Electron Cong., NAECON, 1984. — Dayton, Ohio. N.-Y., 1984. — P. 496—502.
3. Андриенко А.Я. Метод оценивания вектора возмущений в задаче прогнозирования конечного состояния терминальной системы управления // Автоматика и телемеханика. — 1996. — № 3. — С. 71—82.
4. Левенштейн В.И. Применение матриц Адамара к одной задаче кодирования // Проблемы кибернетики. — 1961. — Вып. 5. — С. 22—29.
5. Бортовые терминальные системы управления / Б.Н. Петров и др. — М.: Машиностроение, 1983. — 200 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Б.В. Павловым.

Андриенко Анатолий Яковлевич — д-р техн. наук, зав. лабораторией,

Тропова Елена Ивановна — науч. сотрудник,

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ☎ (495) 334-88-71, ✉ vlaguc@ipu.rssi.ru.

УПРАВЛЕНИЕ ИННОВАЦИЯМИ: МОДЕРНИЗАЦИЯ НА ФОНЕ КРИЗИСА

С 30 ноября по 2 декабря 2009 г. в Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН) проходила международная научно-практическая конференция «Управление инновациями — 2009». Соорганизатором конференции выступил Московский авиационный институт. Данная конференция проводится ежегодно и состоялась уже в четвертый раз, первые три раза она проходила также в ИПУ РАН.

В работе конференции приняли участие около 100 человек, представлявших ведущие научные центры России: МГУ им. М.В. Ломоносова, Институт экономики РАН, Финансовую академию при Правительстве РФ, Центральный экономико-математический институт РАН (ЦЭМИ), Высшую школу экономики (ВШЭ), Институт мировой экономики и международных отношений РАН, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Институт проблем информатики РАН, Московский физико-технический институт (МФТИ), Институт экономики Уральского отделения РАН, Институт США и Канады РАН, а также более чем 20 городов России и ближнего зарубежья — Волгоград, Пермь, Орел, Краснодар, Петрозаводск, Муром, Сургут, Гомель (Белоруссия), Харьков (Украина), Караганду (Казахстан), Оренбург, Калугу, Новочеркасск и др. В течение трех дней работы были заслушаны 10 пленарных и 34 секционных доклада, прозвучал ряд кратких сообщений.

Открывая **пленарное заседание**, председатель Программного комитета д-р экон. наук *Р.М. Нержегородцев* (ИПУ РАН) остановился на особенностях инновационных процессов в период окончания кризиса и начала депрессии, в которую вошла экономика большинства развитых стран. В этот период следует уделить максимальное внимание не широте охвата экономики инновационными процессами, а их осмысленности и системности.

Д-р экон. наук *О.Г. Голиченко* (ЦЭМИ) рассказал о современных принципах осуществления инноваций и их отличиях от принципов, на которых основывались инновационные процессы еще 10—15 лет назад. В частности, основное внимание следует уделять не продуктовым, а процессным инновациям, именно они дают максимальный эффект.

Сетевым моделям распространения инноваций посвятил доклад заместитель директора ИПУ РАН, чл.-корр. РАН д-р техн. наук *Д.А. Новиков*. Современные модели предполагают неравнозначность «узлов» сети, распространяющей инновации, и воздействия на более «влиятельные» узлы этой сети более эффективно в смысле затрат ресурсов, в том числе временных.

Наша задача заключается в том, чтобы не просто объяснить наступление кризиса с точки зрения современных экономических доктрин (например, теории длинных волн), но и спрогнозировать сценарии его преодоления, отметил в своем докладе иностранный член РАН, д-р техн. наук *А.А. Акаев* (МГУ им. М.В. Ломоносова). На примере послевоенного развития ряда стран он показал, какие необходимые условия сопровождают ускоренный экономический рост и каких ошибок в макроэкономической политике при этом следует избегать.

Реализация сформированной в стране антикризисной программы не может быть безболезненной, отметил д-р экон. наук *И.А. Майбуров* (Уральский государственный технический университет). Для того, чтобы препятствий на этом пути было меньше, необходимо согласовать цели этой программы между собой и четко определить, чьи экономические интересы будут ущемлены в ходе ее реализации. Это позволит принимать необходимые меры заблаговременно, а не на стадии обострения конфликтов.

Д-р экон. наук *В.Г. Варнавский* (Институт мировой экономики и международных отношений РАН) посвятил доклад роли машиностроительного комплекса в коренном обновлении производственных процессов в стране. Приведенные им данные позволили поставить ряд острых вопросов о макроэкономических предпосылках инновационных процессов, которые, как ни парадоксально, могут создаваться лишь по мере развития самих этих процессов.

Доклад д-ра экон. наук *О.С. Сухарева* (Институт экономики РАН) был посвящен оценке эффективности инновационных процессов, которая должна существенно зависеть, в частности, от того, какие задачи по развитию экономики на эти процессы возлагаются. Инновационная ловушка —



это процесс с положительной обратной связью, и промедление в принятии радикальных решений лишь уменьшает наши шансы на благополучный выход из состояния технологической отсталости.

Для успешного осуществления инновационных процессов необходимо задуматься над тем, когда и каким спросом будет пользоваться то, что мы делаем сегодня, отметил д-р экон. наук *В.Д. Секерин* (ИПУ РАН), рассказавший о маркетинговой модели распространения и продвижения инноваций.

Канд. экон. наук *Л.П. Стеблякова* (Карагандинский государственный технический университет, Республика Казахстан) остановилась на институциональных аспектах формирования отраслевых кластеров в современных макросистемах.

Доклад д-ра техн. наук *В.В. Цыганова* (ИПУ РАН) был посвящен примерам успешного освоения инноваций в современной России и условиям формирования центра капитала на территории нашей страны.

В рамках конференции на правах круглого стола прошли **девятые Друкеровские чтения «Информационная экономика: институциональные проблемы»**, которые состоялись в Московском авиационном институте. В 2009 г. исполнилось 100 лет со дня рождения Питера Ф. Друкера, поэтому в течение года состоялись пять Друкеровских чтений, посвященных этому юбилею: в марте — в Астане (Казахстан), в июне — в Екатеринбурге, в октябре — в Харькове (Украина), в ноябре — в Гомеле (Белоруссия), и наконец, девятые по счету Друкеровские чтения — в декабре в Москве.

Открывая чтения, д-р экон. наук *Р.М. Нижнегородцев* отметил, что большинство макросистем регулируется так, как если бы они находились в равновесном состоянии, тогда как на самом деле для них типично неравновесие. Два типа неравновесия — рецессионный и инфляционный разрывы — подразумевают разные сценарии развития событий, разную логику регулирования. Те факторы, которые стимулируют инновационные процессы в системах, испытывающих рецессионный разрыв, являются барьерами на пути экономического роста в системах, пребывающих в состоянии инфляционного разрыва. Основная трудность для нашей страны в том, что разные регионы неравновесны в разных смыслах, поэтому они должны управляться в различных режимах, здесь достижение единой логики невозможно.

Д-р экон. наук *М.Ю. Архипова* (Институт проблем информатики РАН) посвятила доклад анализу конкурентоспособных направлений инновационного развития России. Она также остановилась на роли инновационного образования в формировании человеческого потенциала страны, призван-

ного в ближайшем будущем осуществить модернизационный рывок.

Доклад д-ра экон. наук *И.Е. Бельских* (Волгоградский государственный технический университет) был посвящен проблеме поиска инновационных форм, методов и вариантов корпоративных коммуникаций в промышленном бизнесе России. При современном сырьевом характере отечественной экономики потребность в построении многоуровневой коммуникационной работы промышленных предприятий с рынками сбыта относительно невысока, однако по мере построения информационной экономики эта потребность будет неуклонно возрастать.

В нашей экономике много причин, по которым инновационные процессы не могут развиваться быстро и приносить необходимые плоды, подчеркнул д-р экон. наук *Н.Н. Тренев* (ИПУ РАН). Дешевизна живого труда, высокая ставка процента и огромный износ оборудования делают неэффективными инвестиции в большинство отраслей реального сектора. Для изменения сложившегося положения вещей нужно уделить внимание, прежде всего, косвенным методам регулирования макросистемы, не пытаясь административно обеспечить надлежащий технологический уровень производства.

На проблему рисков и ограничений роста нематериального сектора российской экономики обратила внимание *Е.А. Болбот* (МФТИ) в совместном докладе с д-ром экон. наук *В.В. Ключковым* (ИПУ РАН). Сопоставляя Россию с другими странами по структуре экономики, авторы приходят к выводу о необходимости приоритетного развития отраслей, создающих внешние эффекты, — науки, образования, здравоохранения, культуры.

Канд. экон. наук *И.В. Гонтарева* (Харьковский национальный экономический университет, Украина) посвятила доклад источникам формирования системной эффективности предприятия: качество потенциала предприятия, степень функциональной организованности, уровень взаимодействия с внешней средой. Рассмотрена проблема оценки системной эффективности в виде комплекса показателей.

Доклад канд. экон. наук *В.А. Иванюк* (Волгоградский государственный технический университет) был посвящен эконометрическим и экономико-статистическим методам и алгоритмам экономического прогнозирования. В тех случаях, когда требуется огромный объем вычислений или слишком высока неопределенность задачи, на помощь приходят нейросетевые или генетические алгоритмы.

Проблема управления знаниями часто наталкивается на отсутствие реальной мотивации к созда-

нию базы знаний и к формированию механизмов их передачи, отметила канд. экон. наук *М.В. Молодчик* (Пермский филиал ВШЭ). При этом часто декларируется необходимость создания таких баз, но внимание к мотивации этого процесса на удивление фрагментарно. Между тем, задача состоит в том, чтобы выстроить стратегическую систему передачи и наследования знаний, которая отражала бы долгосрочную стратегию развития корпорации в целом.

Проблеме управления транзакционными издержками в академическом секторе науки посвятил свой доклад канд. экон. наук *М.В. Власов* (Институт экономики УрО РАН, г. Екатеринбург). Методика выделения транзакций и расчета издержек оказалась в центре внимания докладчика и вызвала дискуссию, участники которой отметили необходимость проведения расчетов исходя из современных реальностей постатейной калькуляции издержек.

Заседание секции **«Инновационный менеджмент и национальные инновационные системы»** было посвящено обсуждению инновационных процессов на микро- и макроэкономическом уровнях.

Д-р экон. наук *Ю.Б. Иванов* (Харьковский национальный экономический университет, Украина) остановился на вопросах территориальной организации науки и налогового стимулирования инноваций в рамках технопарков.

С результатами кластеризации российских регионов по итогам их социально-экономического положения и инновационной деятельности познакомил канд. экон. наук *И.Н. Щепина* (ЦЭМИ РАН), сделавшая вывод о доминирующих аспектах воздействия инновационной деятельности мезосистем на траекторию их экономической динамики.

Кандидаты экон. наук *М.А. Мотова* и *Т.И. Чинаева* (Центр исследований и статистики науки, г. Москва) уделили внимание состоянию и перспективам развития инноваций в отдельных отраслях промышленности и сферы услуг в современной российской экономике.

Доклад *Ю.Е. Балычевой* (МФТИ) был посвящен рассмотрению «входов» и «выходов» инновационной деятельности в национальной экономике. Сопоставляя восточноевропейские страны и Россию, докладчик показал, что проблемы развития инноваций в России связаны не с недостатком ресурсов, отводимых на эти цели, а с низкой эффективностью их использования.

На поиске более эффективных форм организации научной деятельности остановилась канд. физ.-мат. наук *С.В. Ратнер* (Южный научный центр РАН, г. Краснодар). Ее доклад посвящен ор-

ганизационно-инструментальному обеспечению развития научно-инновационных сетей.

Канд. экон. наук *Е.А. Роговский* (Институт США и Канады РАН) обсудил проблемы ключевых факторов технологических сдвигов в постиндустриальном обществе и отличие этих факторов от традиционных, характерных для эпохи господства индустриальных технологий.

Развитию взаимодействия предпринимательского сектора с другими институциональными секторами в сфере исследований и разработок посвятила свой доклад *А.А. Малкова* (МФТИ), подготовив его совместно с д-ром экон. наук *О.Г. Голиченко*.

Д-р экон. наук *В.В. Клочков* остановился на проблеме связи между экономическими рисками инновационных процессов и барьерами технологического развития, проанализировал институциональные препятствия для эффективной инновационной деятельности в современной российской экономике.

Для успешной реализации инновационной стратегии России необходимо шире развивать государственно-частное партнерство, отметила *С.А. Самоволева* (ЦЭМИ), поскольку ни государство, ни частный бизнес самостоятельно развивать инновационную сферу не могут. Она обсудила рамочные параметры этого партнерства на примерах развитых стран и показала, какие из этих условий имеются налицо в России, а какие еще необходимо сформировать в ближайшем будущем.

Структурный подход к развитию инновационных процессов был предложен в докладе *А.И. Мосалева* (Муромский институт Владимирского государственного университета).

Заседание секции **«Региональные инновационные системы и моделирование инновационных процессов»** открылось докладом д-ра физ.-мат. наук *В.М. Четверикова* (Московский государственный институт электроники и математики), который представил результаты коллективного исследования, посвященного формированию и развитию человеческого капитала в вузе.

Тему человеческого потенциала и его роли в обеспечении инновационных процессов продолжил доклад д-ра экон. наук *П.В. Дружинина* (Институт экономики Карельского научного центра РАН, г. Петрозаводск). Докладчик убедительно показал, что инновационные процессы не могут быть успешными без формирования в регионе собственного научного потенциала, и поделился опытом «покупки лидеров», «покупки мозгов», который накоплен в Карельском регионе, что позволяет обеспечить известные конкурентные преимущества и региональной науке, и промышленному производству.



Доклад канд. экон. наук *О.А. Демидовой* (ВШЭ) позволил взглянуть на проблему развития человеческого потенциала в аспекте его формирования. Докладчик представил результаты расчетов отдачи от различных ступеней образования в современной России и сделал вывод о том, что максимальное воздействие на уровень зарплаты оказывает послевузовское образование.

Для современной экономики вообще и для экономики инноваций в частности характерна неудовлетворенность инструментарием, применяемым в управленческой деятельности, отметил д-р экон. наук *Е.Б. Колбачев* (Южно-Российский государственный технический университет, г. Новочеркасск). Наиболее перспективен для целей управления инструментарий, основанный на концепциях эволюционной экономики и информационной теории систем. На основе соответствующих подходов автором разработаны методики оценки уровня развития производственных систем и оценки квалификационного уровня персонала.

Прозвучавшие доклады вызвали оживленную дискуссию о подходах к развитию человеческого потенциала и методах контроллинга персонала, в которой, помимо докладчиков, приняли участие канд. техн. наук *В.А. Цукерман* (Институт экономических проблем им. Г.П. Лузина Кольского научного центра РАН, г. Апатиты), канд. филос. наук *С.В. Ковалев* (ИПУ РАН), д-р экон. наук *В.В. Ключков*, канд. техн. наук *Д.В. Реут* (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

В докладе д-ра экон. наук *В.С. Жарова* (Кольский филиал Петрозаводского государственного университета, г. Апатиты) был предложен нормативно-целевой подход к оценке уровня инновационности промышленных предприятий и отраслей, в основе которого лежит анализ структуры расходов и стоимости реализуемой продукции по данным бухгалтерской отчетности.

Упрощенные модели управления инновационными проектами в наукоемкой промышленности, основанные на исследовании критериев их эффективности, были представлены в докладе *Н.В. Ивановой* (МФТИ), подготовленном совместно с д-ром экон. наук *В.В. Ключковым*.

Канд. экон. наук *В.Н. Хасанова* (Сургутский государственный педагогический университет) остановилась на роли демографического фактора в динамике качества населения и в процессах формирования и развития человеческого потенциала. Социально-ориентированная политика должна стать основой реализации стратегии инновационного развития России.

Доклад *А.А. Быковой* (Пермский филиал Высшей школы экономики) был посвящен экономет-

рическому анализу влияния отраслевых кластеров на инновационную активность входящих в них промышленных предприятий.

Д-р хим. наук *Н.И. Егоренков* (Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, Республика Беларусь) продемонстрировал фазовую модель товарно-денежного хозяйства, основанную на фрактально-топологической теории нелинейных динамических систем. Из данной модели вытекает, что рыночная экономика характеризуется целым рядом квазиравновесных состояний, каждое из которых относится к определенному технологическому укладу. Различные стационарные состояния возникают при разной средней скорости оборота денег, что в известном смысле дает возможность управления этими состояниями и их осознанного выбора на уровне макроэкономической политики.

С тех пор, как появилась возможность моделировать динамические траектории макросистем, возникла и необходимость пересмотра некоторых, казалось бы, очевидных утверждений современной экономической теории, отметил д-р экон. наук *С.П. Богачев* (Калужский филиал Российского государственного аграрного университета — МСХА им. К.А. Тимирязева). В качестве одного из примеров он показал, что кривая Филлипса, черпающая теоретическое обоснование в неоклассических постулатах равновесной экономики, противоречит реальностям макроэкономических систем, и предложил теоретическое обоснование того, почему неравновесная макродинамика разрушает «закономерности» такого рода.

На заключительном пленарном заседании с информацией о докладах и рекомендациях, прозвучавших на секционных заседаниях, выступили руководители и ведущие секций д-ра экон. наук *Р.М. Нижегородцев*, *О.Г. Голиченко*, *Ю.Б. Иванов*, д-р хим. наук *Н.И. Егоренков*.

Выступавшие отметили высокий научный и организационный уровень конференции. Они поддержали идею расширения круга обсуждаемых проблем и разработки ряда междисциплинарных направлений, высказали уверенность в том, что данная ежегодная конференция стала центром интеграции усилий и обмена опытом для ученых России и ближнего зарубежья, исследующих различные аспекты инновационных процессов.

Председатель Программного комитета
Р.М. Нижегородцев

Нижегородцев Роберт Михайлович — д-р экон. наук, гл. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ☎ (495) 335-60-37; ✉ bell44@rambler.ru.

XVII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ»

В декабре 2009 г. в Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН) состоялась XVII международная конференция «Проблемы управления безопасностью сложных систем». Организаторы конференции, помимо ИПУ РАН, — Российский государственный гуманитарный университет, Институт прикладной математики РАН им. М.В. Келдыша и Министерство по чрезвычайным ситуациям Российской Федерации. В конференции приняли участие 225 авторов (в том числе 17 из дальнего зарубежья, 12 — из ближнего), приславших 149 докладов.

Работа конференции велась по следующим секциям:

- общетеоретические и методологические вопросы обеспечения безопасности;
- проблемы обеспечения экономической и социально-политической безопасности;
- проблемы обеспечения информационной безопасности;
- экологическая и техногенная безопасность;
- методы моделирования и принятия решений при управлении безопасностью сложных систем;
- автоматизированные системы и средства обеспечения безопасности сложных систем;
- правовые вопросы обеспечения безопасности сложных систем.

Работа конференции открылась программным докладом «Информационное управление: методология поддержки крупномасштабных стратегических проектов», подготовленным авторским коллективом из Института социально-политических исследований РАН и ИПУ РАН во главе с чл.-корр. РАН В.Л. Шульцем. В работе приведены результаты анализа комплекса методологических и практических проблем информационной поддержки государственной политики Российской Федерации в Арктике в условиях активного противодействия со стороны геополитических противников, вызванной ростом конкуренции развитых и развивающихся стран за стратегические источники сырья, владение которыми обеспечивает возможность «выживания» государств в кризисных и посткризисных условиях. Детально рассмотрена разработанная авторами формализованная методология сценарного моделирования и многокритери-

альной оценки результативности информационных кампаний с использованием системы количественных и качественных показателей эффективности. Проведен анализ различных стратегий информационного воздействия. Рассмотрены задачи сценарного моделирования и анализа информационных угроз. Практическое применение разработанной методологии должно стать одним из шагов в формировании государственной системы информационного управления, которая, в свою очередь, должна активно способствовать устойчивому бескризисному социально-экономическому развитию Российской Федерации в условиях жесткой геополитической конкуренции.

Большой интерес вызвала работа *Митина Н.А., Малинецкого Г.Г., Зульпукарова М.-Г. М., Лукина В.В.* «Системный анализ, мониторинг, прогноз и моделирование техногенных катастроф России». Необходимо полностью согласиться с авторами в том, что прошедший 2009 год, сопровождавшийся рядом крупных техногенных и природных катастроф, заставляет во многом по-новому взглянуть на методологические проблемы обеспечения безопасности, а также объективно требует увязки причин возникновения кризисов и катастроф с глобальными проблемами в развитии человеческого общества на современном этапе. Это, в свою очередь, предопределяет необходимость развития теории управления риском на основе междисциплинарных подходов и, в частности, теории самоорганизации и синергетики, активно развиваемой в настоящее время в Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН.

Основное внимание авторы уделили ключевым результатам комплекса исследований, проведенных с использованием упомянутых подходов. В частности, по утверждению авторов, накопленный опыт предупреждения и ликвидации последствий техногенных катастроф позволил сформулировать ряд принципиальных трудностей, возникающих в связи с недоступностью достоверной, необходимой и достаточной исходной информации по большинству объектов техносферы, связанной с ее «ведомственной приватизацией»; отсутствием «системного сопряжения» данных различного характера и типа; отсутствием высококвалифициро-



ванных экспертов, аналитиков и специалистов, а также единого наделенного соответствующими полномочиями «исполнительного органа», который мог бы обеспечивать эффективное противодействие угрозам возникновения чрезвычайных ситуаций. Среди первоочередных задач повышения эффективности управления рисками техногенных катастроф авторы выделяют необходимость создания и внедрения современных технологий консервации, утилизации, перепрофилирования части техносферы России; разработки эффективных проектов модернизации или создания новой технологической инфраструктуры страны с учетом связанных с ними рисков и угроз; отработки комплексов мер по предупреждению техногенных катастроф и чрезвычайных ситуаций, возникающих при переводе экономики в высокопродуктивное состояние.

Одной из актуальных и обсуждаемых работ стал доклад *Цыганова В.В.* «Проблемы централизации государственного управления». Основываясь на классической теории циклического развития мировой экономики, автор утверждает, что стабильность социально-экономической системы государства и общества в целом обеспечивается периодическим изменением соотношения уровней либерализации и централизации системы управления. Действительно, анализ накопленного опыта рыночного развития России показывает, что основные причины невысокой эффективности отечественной экономики заключаются в высоком уровне внешних задолженностей (в первую очередь корпоративных экономических субъектов), незначительном объеме государственных инвестиций в реальный сектор отечественной экономики и инфраструктурные проекты, несовершенстве и несоответствии современным условиям существующей системы государственного управления. В этих условиях, как утверждает автор, преодоление последствий экономического кризиса возможно только при условиях усиления роли государства в управлении социально-экономическим развитием страны, создания реальных рычагов влияния органов исполнительной власти на деятельность экономических субъектов различных форм собственности, разработки эффективных механизмов национального планирования, межотраслевого и межрегионального взаимодействия, основанных на оптимальном соотношении между централизацией и либерализацией.

Ряд интересных докладов был посвящен теоретическим и практическим проблемам разработки математических методов и технологий сценарного анализа и имитационного моделирования процессов управления безопасностью на отраслевом, региональном и объектовом уровнях, среди которых

можно отметить следующие работы: *Кононов Д.А., Омурбеков М.А., Роцин П.Е.* «Моделирование устойчивого развития территориальных образований Кыргызской Республики»; *Шулигина О.А., Чернов И.В.* «Сценарии управления борьбой с наркобизнесом (на примере Омской области)»; *Кретов В.С., Котов М.Н.* «Компьютерное прогнозирование развития межгосударственного конфликта»; *Барбашев М.П., Шелков А.Б.* «Сценарии развития Калининградской области»; *Дашкова О.А., Шулигина О.А.* «Результаты сценарного исследования региона — Республика Саха (Якутия)»; *Берман А.Ф., Николайчук О.А., Павлов А.И., Юрин А.Ю.* «Сценарии нарушения безопасности и их автоматизированное построение»; *Лепеса Н.В., Ракитина М.С.* «Механизмы управления миграционными процессами для обеспечения безопасности сложных систем»; *Черепов А.Н., Буденчук А.В.* «Использование функциональных графов для описания сложных экономических систем»; *Золотовский Д.В.* «Методика построения имитационных систем моделирования»; *Портнягин А.И.* «Применение графоаналитических методов при разработке управленческих решений»; *Панасенко И.М., Бабинов В.М.* «Некоторые аспекты моделирования в сенсорных сетях»; *Муромцев В.В., Муромцева А.В.* «Модель современных коммуникаций»; *Гусев А.В., Котов Ю.Б., Орджоникидзе З.Г., Павлов В.И., Эсселевич И.А.* «Об экспертном определении достижения спортсменом предельной нагрузки в ходе тестирования».

Одна из характерных особенностей нынешней конференции состоит в заметном росте интереса к теоретическим и прикладным проблемам обеспечения техногенной и экологической безопасности, о чем свидетельствует большое число интересных и разнообразных по тематике докладов.

В работе *Микрина Е.А., Кочкарова А.А., Сомова Д.С.* «Прогнозирование критических явлений в сложных системах. Метод структурно-интегрированных индикаторов» рассмотрены проблемы обеспечения надежности функционирования сложных технических систем, от которой зависит уровень безопасности функционирования объектов управления различного назначения. Появление ошибок в работе таких систем и внешние воздействия, как правило, имеют внезапный характер. Более того, для сложных многоэлементных систем рассматриваемого класса не исключен «эффект домино», когда поначалу небольшие внешние помехи и воздействия могут вывести из строя на длительный срок всю систему. Для решения поставленной задачи авторы предлагают применить теоретико-графовый подход, обеспечивающий представление сложных систем на базе иерархии упрощенных моделей. На нижнем уровне находятся модель распространения внешних воздействий по струк-

туре системы и модель ее структурного разрушения. Модели следующих уровней получаются из предыдущих комбинированием либо добавлением новых факторов. Наиболее полной моделью в представленной иерархии служит комплексная модель аварийной ситуации. В соответствии с предложенным подходом состояние системы и ее элементов должно отслеживаться на имитационном стенде, в основу которого положена математическая модель поведения системы в чрезвычайных ситуациях. Основная задача состоит в оптимизации размещения индикаторов в структуре системы и обеспечении полноты их набора.

Среди большого числа разнообразных докладов, посвященных проблемам обеспечения безопасности и надежности технологических комплексов, объектов и систем управления, можно также выделить следующие работы: *Мусаев В.К., Ганиев Р.Ф., Нигматулин Р.И., Соловьев А.А., Суцев С.П.* «О приоритетах опасности при оценке безопасности сложных технических объектов»; *Иванов В.П., Завадский В.К., Каблова Е.Б., Кленовая Л.Г.* «Принципы и методы обеспечения безопасности в терминальных задачах управления при выведении жидкостных РН»; *Мавлянкариев Б.А., Насиров А.А., Хатамов Б.Б., Пен А.Ю., Кабышев Т.Н., Дильмагамбетова Б.М.* «Поддержание работоспособного состояния систем сигнализации охранной и пожарной безопасности объектов: проблемы и решения» *Чернов К.В.* «О тотальном подходе к проблеме техногенной безопасности»; *Борисов В.Г., Данилова С.К., Чинакал В.О.* «Повышение безопасности управления морскими подводными объектами на этапе их проектирования»; *Степанова А.С.* «Формирование структур управления безопасностью систем жизнеобеспечения»; *Кусакина Ю.Н.* «Технологический аудит как один из факторов обеспечения стратегической безопасности производственных предприятий»; *Косяченко С.А., Крапчатов А.И.* «Методы оценки трудоемкости процесса отладки модульного программного обеспечения и внесения в него изменений»; *Жарко Е.Ф.* «Оценка качества программного обеспечения для АСУТП АЭС»; *Шиянов С.М., Куранцов О.В., Склярова Е.В., Куранцов В.В., Нвачукву О.П.* «О диагностике надежности и безопасности технических систем»; *Кондратьев В.Д.* «Применение методов комплексного оценивания при решении задач по повышению безопасности дорожного движения»; *Мамедли Э.М., Мельников Л.И.* «Метод определения требований к характеристикам вычислителя резервного канала комбинированной системы улучшения устойчивости и управляемости летательного аппарата»; *Майданович О.В., Осипенко С.А., Павлов А.Н.* «Исследование структурной надежности при реконфигурации сети»; *Сафронов А.И.,*

Сидоренко В.Г. «Применение критерия равномерности движения в сложных транспортных системах»; *Крапчатова Н.В., Савицкая Т.В.* «Комплекс программных средств по анализу риска и оценки последствий аварий на химически опасных объектах»; *Бандурина Н.В.* «Вопросы правового обеспечения безопасности использования атомной энергии в деятельности государственной корпорации "Росатом"»; *Денисов А.Н., Журавлев Н.М., Захаревский В.Б., Шевцов М.В.* «Метод оперативного управления пожарными подразделениями»; *Иванников А.П.* «Методика расчета типового пожара при отсутствии и использовании системы радиоканального мониторинга пожарной безопасности "Стрелец"»; *Дружинина О.В., Климова Д.В.* «О безопасности движения поезда при сейсмических воздействиях»; *Куранцов В.А., Ситник С.В., Суцев Т.С., Сазонов К.Б., Зимина Т.М.* «О проблемах безопасности на химических объектах»; *Топольский Н.Г., Сатин А.П.* «Некоторые способы обеспечения эффективности материально-технического обеспечения в подразделениях МЧС России».

Большой интерес вызвал доклад *Комкова Н.И.* «Вызовы современному технологическому развитию», посвященный анализу проблем и перспектив технологического развития человеческого общества. Как утверждает автор, в настоящее время человечество сталкивается как со «среднесрочными вызовами» (глобальное потепление, превышение уровня мирового океана, рост численности населения земли, финансово-экономический кризис и др.), так и «долгосрочными», обусловленными, например, ускоряющимися темпами приближения предела технологического развития (точки сингулярности), играющей все более весомую роль в развитии общества телекоммуникационной и вычислительной техники. По оценкам экспертов, среднесрочные вызовы уже проявляются, а крайний срок наступления долгосрочных ориентировочно оценивается 2035 годом.

Анализируя сущность процессов глобальных климатических изменений, а также содержание ряда международных договоренностей и соглашений о совместном противодействии промышленным выбросам и принятым в соответствии с ними механизмов взаимодействия государств, автор подчеркивает необходимость не противодействия, а разумного и обоснованного участия в них России, в процессе которого главным должно стать использование позитивного мирового опыта в технологическом развитии национальной экономики. Касаясь проблем, к которым приводят «долгосрочные вызовы», автор предполагает, что, несмотря на объективные трудности прогнозирования развития цивилизации в отдаленной перспективе, преодоление точки сингулярности приведет к за-



вершению экстенсивного пути технологического развития человеческого общества и переходу к качественному росту преимущественно благодаря использованию интенсивных факторов.

Различным аспектам решения проблем обеспечения экономической и социальной безопасности, а также управления рисками различной природы посвящена достаточно широкая группа представленных на конференции докладов, среди которых можно выделить работы *Цыганова В.В., Бородина В.А.* «Антикризисное управление научно-техническим прогрессом и социально-экономическая безопасность России»; *Песикова Э.Б., Заикина О.А.* «Оценка экономической безопасности и управление рисками виртуального предприятия с использованием метода анализа иерархий и статистического моделирования»; *Кравченко Н.В.* «Некоторые аспекты совершенствования алгоритма противодействия теневой экономике как необходимое условие обеспечения экономической безопасности»; *Поляка Г.Л.* «Управление процессом зерновых интервенций как составляющих продовольственной безопасности»; *Егоровой-Гудковой Т.И.* «К вопросу об использовании математики гармонии в управлении экономической безопасностью государства»; *Сердюкова В.А.* «Вашингтонский консенсус и безопасность экономики»; *Левина В.И.* «Проблема подготовки ученых и безопасность российского государства»; *Крпачевой И.Н.* «Нормативно-прикладные аспекты проблемы обеспечения безопасности личности в сфере уголовного судопроизводства»; *Овчинниковой Т.И., Турецкого И.Я.* «Устойчивое развитие с позиции системного подхода»; *Кедровой Г.Е.* «Языковая политика как значимый фактор национальной безопасности»; *Локтухиной Н.В.* «Выявление базисных процессов в рынке труда на основе системного подхода»; *Карпенко Т.Н.* «Управление технико-экономическими рисками сложной промышленной системы»; *Ермакова В.В.* «Маркетинговое прогнозирование как основа обеспечения безопасного и долгосрочного развития крупных промышленных предприятий»; *Балаяна Г.Г., Иващенко Н.П., Мамонтовой Н.Г., Худавердиева С.В.* «Условия и риски освоения инноваций»; *Филиппова В.А., Богатыревой Л.В.* «Экономическая безопасность транснациональных корпораций и аналитические центры»; *Тренева Н.Н.* «Факторы экономической безопасности в стратегических решениях управления корпорацией»; *Чефрановой М.А.* «Математические модели повышения безопасности кредитного процесса»; *Кафидова В.В.* «Кадровая безопасность социально-экономических систем»; *Белюсова А.С.* «Особенности управления коммерческим банком в условиях экономического кризиса»; *Поморцевой И.М.* «Методы оценки рисков финансовых инвестиций»; *Егоро-*

вой Е.В. «Финансовая безопасность деятельности предприятия».

Доклад *Мусаева В.К., Шиянова М.И., Попова А.А., Ситника В.Г., Федорова А.Л.* «О мониторинге эксплуатационной безопасности строительного объекта» посвящен одной из актуальных проблем обеспечения промышленной безопасности. Как утверждают авторы, в настоящее время более 75 % основных фондов потенциально опасных строительных объектов выработали свой ресурс, однако процесс их эксплуатации продолжается, что приводит к авариям, связанным с обрушением конструкций. Анализ риска и причин подобного рода аварий показывает, что они происходят в зданиях и сооружениях, обследование технического состояния которых длительное время не проводилось. Сложившееся положение усугубляется отсутствием системного подхода при оценке безопасности строительного объекта, недостаточностью оценок и методов определения его технического состояния, сложностью и новизной технологий комплексного мониторинга технического состояния конструктивных элементов зданий и сооружений. По мнению авторов работы, в этих условиях важнейшими направлениями обеспечения промышленной безопасности строительных объектов является совершенствование нормативно-технического обеспечения условий безопасной их эксплуатации и непрерывного мониторинга технического состояния конструкций. Необходима и разработка эффективных механизмов лицензирования и аккредитации соответствующих экспертных организаций, а также системы независимого строительного контроля, включая авторский и технический надзор.

Ряд безусловно интересных работ посвящен проблемам обеспечения экологической безопасности: *Дудников Е.Е., Нгуен Ми, Чинакал В.О.* «Повышение безопасности разработки горнорудных объектов с использованием интеллектуальных средств»; *Карпенко Н.П., Манукьян Д.А.* «Проблемы экологической безопасности в задачах природообустройства»; *Мастушкин М.Ю.* «Проблемы обеспечения экологической безопасности и техническое регулирование»; *Мосягин А.Б.* «Управление безопасностью промышленных объектов»; *Волков В.Ю., Батышкина В.В., Самаха Б.А.* «Проблемы реализации функций управления в автоматизированной системе экологического мониторинга г. Новомосковска Тульской области»; *Воронин И.В.* «Прогнозирование и моделирование процессов управления безопасностью на предприятиях автосервиса»; *Дараган С.В., Казакова И.Е., Першина Э.С.* «О взаимосвязи исследований моделей туризма с наличием экологической безопасности регионов».

Большая группа докладов посвящена решению проблем управления информационной безопасностью автоматизированных систем различного класса: *Бритков В.Б., Геловани В.А.* «Интеграция информационно-аналитических ресурсов для поддержки принятия решений, связанных с безопасностью»; *Архипова Н.И., Кононов Д.А., Кульба В.В.* «Проблема выбора сценария управления мониторингом безопасного функционирования сложных систем»; *Ястребов Д.А.* «Международные стандарты построения системы управления информационной безопасностью»; *Бухарин С.Н., Ковалев В.И., Малков С.Ю.* «Об основных понятиях теории информационного поля»; *Завьялов О.Ю.* «Алгоритм мониторинга данных в условиях информационного противоборства»; *Половко М.Ю., Ракитина М.С.* «Исследование информационной безопасности Интернет-ресурсов»; *Буланов Б.В.* «Комплексный подход к обеспечению информационной безопасности объекта»; *Мистров Л.Е.* «Системный подход к исследованию проблемы информационной безопасности»; *Ковалев С.В.* «Методология информационной безопасности сложных систем на основе системы управления промышленными рисками»; *Стюгин М.А.* «Методы защиты систем от исследования»; *Сатунина А.Е., Сысоев А.С.* «Подходы к проектированию безопасности в сервис-ориентированных архитектурах»; *Верещагин А.В., Никифоров С.В.* «О повышении быстродействия и безопасности автозагрузки в MS Windows».

Традиционно разнообразны по прикладной тематике доклады, посвященные обсуждению опыта проектирования и практического применения в процессе управления рисками автоматизированных систем различного класса и назначения. В этом плане можно выделить следующие работы: *Прус Ю.В., Блудный Н.П., Буцынская Т.А., Топольский Н.Г.* «Научный Интернет-портал «Технологии и системы безопасности»»; *Алексейчук А.Е.* «Об одном варианте методики построения системы информационной безопасности организационных структур управления»; *Зуенкова И.Н.* «Контроль параметров безопасности на рабочем месте оператора реакторного отделения для АЭС с ВВЭР-1000»; *Мосягин А.А.* «Оценка эффективности мониторинга системы газоснабжения объектов жилищно-коммунального хозяйства»; *Мачкин П.И.* «КАММОП-технология и ее применение при анализе проблем создания и развития систем управления безопасностью»; *Гайнанишина Л.А.* «Автоматизированная система СИРИУС-НТ и ее применение в системах управления безопасностью сложных систем»; *Грудцин С.Н.* «Реализация межпрограммного взаимодействия на основе ИНТЕРКОМП-технологии»; *Корнилов М.В.* «Проблемы создания и развития специального программного обеспече-

ния автоматизированных систем управления безопасностью»; *Кудинов Д.С.* «Пути решения проблем архитектуры и стратегии создания и развития системы классификации и кодирования информации, обрабатываемой в автоматизированных системах управления безопасностью»; *Чанхиева Ф.Ю.* «Анализ необходимых свойств разработки автоматизированных информационно-управляющих систем в сфере образования»; *Лазаренко С.А.* «Пути решения проблем архитектуры и стратегии создания и развития автоматизированных систем управления безопасностью»; *Косоруков Е.О.* «Синтез многопроцессорной системы с нефиксированными параметрами»; *Бутузов С.Ю., Любавский А.Ю.* «Устойчивость функционирования АСУ взрывопожарозащитой промышленных объектов»; *Гумениук Ю.С.* «Пути решения проблем архитектуры и стратегии создания и развития системы эксплуатации автоматизированных систем управления безопасностью»; *Хворостин С.В.* «Пути решения проблем архитектуры и стратегии создания и развития информационного обеспечения автоматизированных систем управления безопасностью»; *Бузников С.Е.* «Метод построения виртуальных датчиков информации систем активной безопасности автомобиля».

К сожалению, объективные ограничения на объем данной публикации не позволили сделать более полный обзор и, тем более, раскрыть содержание представленных на конференции разнообразных по тематике и безусловно интересных докладов. Более подробно ознакомиться с представленными работами можно в опубликованных материалах конференции¹.

В заключительном слове председательствующий д-р техн. наук, профессор *В.В. Кульба* сообщил о планах проведения XVIII конференции по рассматриваемой тематике, которая, по сложившейся традиции, пройдет в декабре 2010 г. в Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. Тел. оргкомитета (495) 334-89-59, e-mail: conf20@ipu.ru. Технический секретариат конференции: *Галина Павловна Харькова, Алла Фариссова и Ибрагимова.*

*Ученый секретарь Оргкомитета конференции,
канд. техн. наук А.Б. Шелков*

Шелков Алексей Борисович — канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ☎ (495) 334-89-59; e-mail: shelkov@ipu.ru

¹ *Проблемы управления безопасностью сложных систем / Тр. XVII междунар. конф., г. Москва, ИПУ РАН, дек. 2009 г. — М., 2009. — 520 с.*



Александр Семенович РЫКОВ (к 65-летию со дня рождения)

7 февраля 2010 года исполнилось 65 лет известному ученому в области системного анализа, методов оптимизации и принятия решений, заслуженному деятелю науки Российской Федерации, доктору технических наук, члену редколлегии журнала «Проблемы управления», профессору Александру Семеновичу Рыкову.

В 1969 году А.С. Рыков окончил Московский физико-технический институт (МФТИ) по специальности «Системы автоматического управления». С 1969 по 1976 г. работал в Институте проблем управления АН СССР, затем во Всесоюзном научно-исследовательском институте системных исследований ГКНТ и АН СССР (ныне Институт системного анализа РАН), с 1982 г. по настоящее время работает в Московском институте стали и сплавов, пройдя путь от старшего преподавателя до профессора. С 2006 г. является профессором МФТИ. В 1978 г. защитил кандидатскую диссертацию «Разработка и исследование симплексных процедур оптимизации с управляемым шагом», в 1986 г. — докторскую диссертацию «Теория и методы управляемого прямого поиска». В 1994—2002 гг. ему трижды присуждалась Государственная научная стипендия для выдающихся ученых России.

Профессор А.С. Рыков является автором нового класса поисковых методов оптимизации — методов деформируемых конфигураций. Особенность методов заключается в многовариантности их реализации в виде конкретных алгоритмов (для безусловной оптимизации — до нескольких сотен).

Другое направление его исследований относится к разработке новых методов диалогового принятия решений в условиях неопределенности, проявляемой в виде многокритериальности, статистической неопределенности, нечеткости и недостаточности информации. А.С. Рыковым предложены формальные математические модели принятия решений при различных видах неопределенности, разработаны специальные универсальные комбинированные критерии для снятия неопределенности, учитывающие степень доверия к априорной информации лица, принимающего решения, различные подходы и методы преодоления многокритериальности задач принятия решений.

Важность подходов и методов А.С. Рыкова определяется возможностью решения с их помощью широкого круга прикладных задач — от чисто модельных до оптимизации реальных объектов в режиме нормальной эксплуатации.



На основе разработанных А.С. Рыковым методов оптимизации и принятия решений созданы компьютерные системы автоматизированного управления на многих металлургических комбинатах, нефтеперерабатывающих и химических предприятиях и др.

Разработанные А.С. Рыковым диалоговые методы принятия решений и поисковые методы деформируемых конфигураций составили основу процедур оптимизации алгоритмов управления и технических структур ряда промышленных систем автоматизации при их разработке, испытании и наладке. Разработанные системы автоматизации управления внедрены на пяти углеобогатительных фабриках и многих угольных шахтах.

А.С. Рыков активно сотрудничает и проводит совместные исследования с Оксфордским университетом (Великобритания), Словацким техническим университетом, Институтом теории информации и автоматизации Чешской академии наук, Вальядолидским университетом (Испания), Гонконгским университетом (Китай) при поддержке международных исследовательских грантов. Приглашался для чтения лекций и выступлений на семинарах в Великобританию, Францию, Испанию, Канаду, Германию, Чехию, Словакию, Алжир, Китай.

Профессор А.С. Рыков — автор более 200 научных трудов, за последние годы он выпустил семь монографий, 10 учебных пособий. Разработал программы и читает учебные курсы: «Исследование операций и методы оптимизации», «Математические методы системного анализа», «Математические методы системного анализа в экономике», «Системный анализ и моделирование процессов в техносфере».

С 1999 по 2008 г. он был членом Экспертного совета по управлению, вычислительной технике и информатике ВАК России, является автором кратких паспортов и программ кандидатских экзаменов по специальностям «Системный анализ, управление и обработка информации» и «Управление в социальных и экономических системах». С 2005 г. является членом бюро по информационным технологиям и вычислительным системам РФФИ.

Коллеги и друзья Александра Семеновича знают его как талантливого ученого, скромного и доброжелательного человека, неутомимого труженика и примерного семьянина, надежного товарища, всегда готового помочь и словом, и делом.

Дорогой Александр Семенович! Поздравляем Вас с днем рождения, желаем здоровья и новых творческих успехов!

*Редакционная коллегия
Редакция*

CONTENTS & ABSTRACTS

ROBUST CONTROL OF THE LINEAR SINGULAR-DISTURBED PLANTS.2

Tsykunov A.M.

The problem of control of a linear plant, which mathematical model is described by the singular- disturbed differential equations with an a priori unknown parameters, is solved. The algorithms of control providing indemnification of parametrical and external disturbance with required accuracy, as well as conditions under which the initial model may be decomposed by allocating of fast and slow components, are received. The received results are illustrated by a numerical example.

Keywords: robust control, observer of the derivatives, singular-disturbed system, state vector, auxiliary contour.

METHOD OF FAULT-TOLERANT CONTROL FOR NONLINEAR DYNAMIC SYSTEMS: LOGIC-DYNAMIC APPROACH11

Shumsky A.E., Zhirabok A.N., Bobko Ye.Yu.

The method of solving control problem for nonlinear dynamic systems with faults on the basis of logic-dynamic approach is suggested.

Keywords: nonlinear dynamic system, fault, fault-tolerant control, logic-dynamic approach.

RAPID ESTIMATION OF THE TENDENCY OF COMPLEX DYNAMICAL SYSTEMS TO DEGENERATION ON THE BASIS OF ROBUST COMPUTING PROCEDURES.19

Dudarenko N.A., Polyakova M.V., Ushakov A.V.

The paper considers the problem of estimation of propensity to system degeneration of complex dynamic systems. The algorithm of estimation of degeneration functional based on robust computing procedures is proposed. The statements put forward are illustrated by an example.

Keywords: rapid estimation, functional degeneration, complex system, criterial matrix, robust computing procedure.

ECONOMIC PROBLEMS OF HIGH RISK INNOVATION PROJECTS MANAGEMENT IN SCIENCE-INTENSIVE INDUSTRIES25

Ivanova N.V., Klochkov V.V.

The paper proves the need of high risk innovation projects for Russian science-intensive industry. Special attention is paid to the branches producing costly products with long lifecycle. The most principle kinds of risk are analyzed, the model of optimal diversification of exploratory research is suggested.

Keywords: «breakthrough» products, time competition, lock-in effect, exploratory research, risk, diversification.

MEDIA REACH CALCULATION34

Popov E.V., Shmatov G.A.

The paper develops the analytical instrument of media reach calculation. The recurrence relation for the media reach range is derived, the characteristics of the media reach frequency distribution behavior are analyzed, the formula of media reach calculation is generalized and the audience reach calculation error is estimated. The analytical instrument developed permits to meet the challenge connected with advertising budget management and advertising placement optimization.

Keywords: media reach frequency distribution, audience reach calculation error, optimization.

SYSTEM OF EMPLOYEES' PERSONAL MOTIVATION IN THE COURSE OF NEW PRODUCT MASTERING.39

Olenev S.E.

The paper covers new methodology of employee's personal motivation, based on the mathematical model, which reflects increasing

rates of output during the time of new product launching. This model provides objective appraisal of employee's input and qualification in each manufacturing operation, which allows to set close dependence between his output and salary.

Keywords: automation, modeling, motivation, forecasting, output, mastering, rate of output.

AGENT BASED MODELING AS A TOOL FOR DEMAND ANALYSIS AND FORECASTING IN ENERGY 46

Suslov S.A., Kondratyev M.A., Sergeev K.V.

Agent-based modeling and simulation was applied to investigate a set of problems in the energy context. The paper shows advantages of the agent based modeling approach. The method to define agents-consumers in simulation tool AnyLogic and the approach to simulating investment project risk are suggested.

Keywords: simulation, agent based modeling, AnyLogic, demand for energy forecasting, simulation based management, risk analysis, decision support tool.

MODELS, KNOWLEDGE AND EXPERIENCE FOR CONTROL OF TECHNOGENIC SAFETY 53

Berman A.F., Nikolaychuk O.A.

General principles, approaches, methods of investigation have been formulated and control actions directed to provision of technogenic safety have been determined. Considered are accidents and technogenic extreme situations, which are conditioned by destruction or depressurization of unique mechanical systems inside technological complexes exploited for the processes running under extreme values of technological parameters of hazardous agents. Some issues related to investigation and control of the states of technological complexes and unique mechanical systems inside them are discussed.

Keywords: technogenic safety, cause-effect complex, states, technique, models, knowledge, experience, information technologies.

SYNCHROMODELS IN DATA VALIDATION OF CONTROL SYSTEMS 61

Sidorov A.A., Zakharchenko V.E.

The article investigates a problem of data validation in control systems. A so-called syncromodel is suggested as a solution. It is based on simulation of control object and interval calculations. Syncromodel functions synchronously with the control object. Fuzzy sets theory is used to determine the measure of data validity.

Keywords: data validation, cleaning data, syncromodel, dirty data, control systems, parameters, simulating model, fuzzy set.

ALGORITHMS FOR FAST ESTIMATION OF HIGH DIMENSION VECTOR. 69

Andrienko A.Ya., Tropova E.I.

The problem of planning of programmed control of mobile object under conditions of deficiency and aprioristic uncertainty of time allocated for the planning is considered. For solution of this problem algorithms for fast estimation of vectors of parameters of high dimension are suggested.

Keywords: vector of indignations of high dimension, algorithm for fast estimation, deficiency of time estimation.

XVII INTERNATIONAL CONFERENCE «PROBLEMS OF COMPLEX SYSTEMS SAFETY CONTROL» 74

INNOVATION MANAGEMENT: MODERNIZATION ON THE BACKGROUND OF THE CRISIS 78

ALEXANDER SEMENOVICH RYKOV (to the 65-th anniversary) 83