



CONTROL SCIENCES

**Научно-технический
журнал**

6 номеров в год

ISSN 1819-3161

УЧРЕДИТЕЛЬ

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
http://pu.mtas.ru

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

Отпечатано в
ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН

Подписано в печать
29.06.2009 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

4.2009

СОДЕРЖАНИЕ

Анализ и синтез систем управления

- Александров А.Г., Орлов Ю.Ф. Конечно-частотная идентификация:
динамический алгоритм 2
- Жуков В.П. Достаточные условия грубости неавтономных нелинейных
динамических систем в смысле сохранения характера устойчивости 9
- Ходашинский И.А. Идентификация нечетких систем: методы и алгоритмы 15

Управление в социально-экономических системах

- Золотова Т.В. Корпоративная модель согласования интересов с учетом
экологических факторов 24
- Михненко П.А. Оптимизация процесса адаптации хозяйственной организации
к изменениям внешней среды. 32
- Демкин И.В., Перцев Д.В. Метод оценки интегрированного риска портфеля
инновационных проектов. Ч. 2. Методические особенности оценки
интегрированного риска портфеля инновационных проектов 39

Управление подвижными объектами

- Андрienко А.Я., Лосев Г.П., Тропова Е.И. Совершенствование алгоритмов
действия расходомерных контуров системы управления ракеты-носителя 46

Информационные технологии в управлении

- Дорри М.Х., Рошин А.А. Инструментальный программный комплекс
«Расчет динамических систем» — средство моделирования и разработки
алгоритмов управления 52
- Николайчук О.А. Моделирование знаний для исследования динамики
технического состояния уникальных объектов 58
- Саакян А.А. Исследование свойств показателей качества систем распознавания
речи 66
- Агаронян О.С. Иерархическая адаптивная сегментация изображения 74

Хроника

- Общероссийский семинар «Современные методы навигации и управления
движением: информационно-управляющие системы автономных движущихся
объектов» 80
- IV международная научная конференция «Проблемы регионального
и муниципального управления» 83

* * *

Contents and abstracts. 87

КОНЕЧНО-ЧАСТОТНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ: ДИНАМИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ

А.Г. Александров, Ю.Ф. Орлов

Предложен новый алгоритм конечно-частотной идентификации линейного устойчивого объекта в присутствии неизвестного ограниченного возмущения, позволяющий получить более высокую точность. Доказана его сходимость.

Ключевые слова: идентификация, линейные системы, частотный подход, неизвестные ограниченные возмущения.

ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени разработан ряд методов идентификации объектов управления, описываемых линейными дифференциальными уравнениями. Эти методы условно можно разделить на две группы в зависимости от предположений о помехах измерения и внешних возмущениях, приложенных к объекту.

Первую из них составляют методы идентификации объектов, помехи и внешние возмущения в которых — случайные процессы с известными статистическими характеристиками. Это различные варианты метода наименьших квадратов и метода стохастической аппроксимации. Их описание приводится в известных книгах [1, 2].

Вторая группа — это методы идентификации при неизвестных ограниченных помехах и внешних возмущениях (с неизвестными статистическими характеристиками): рандомизированные алгоритмы [3, 4] и конечно-частотная идентификация [5].

Особое место занимает метод инструментальных переменных [2, 6]. Разработанный в рамках первой группы он применим, в отличие от других методов этой группы, для решения задач второй группы, и поэтому будем относить его к последней.

Процесс идентификации может быть пассивным либо активным. В случае пассивной идентификации измеряемым входом объекта служит управление, которое зависит от целей объекта и не связано с задачей идентификации. Может случиться что при таком входе идентификация объекта не-

возможна. В связи с этим применяется активная идентификация, при которой измеряемый вход объекта содержит наряду с управлением дополнительное воздействие (испытательный сигнал), предназначенное для идентификации объекта.

Метод конечно-частотной идентификации предназначен для активной идентификации. Испытательный сигнал представляет собой сумму гармоник с автоматически настраиваемыми (самонастраиваемыми) амплитудами и частотами. Число этих гармоник не превышает размерности вектора состояний объекта управления. Самонастройка амплитуд осуществляется для выполнения требований к допустимым границам входа и выхода объекта, которые выполняются, когда испытательный сигнал отсутствует.

Полезно сравнить возможности метода конечно-частотной идентификации с другими методами второй группы, которые являются более общими и могут применяться как для пассивной, так и для активной идентификации.

Рандомизированные алгоритмы предполагают, что испытательный сигнал — случайный процесс с известными статистическими характеристиками и поэтому трудно гарантировать заданные допуски на выходы объекта.

В работе [7] сравниваются возможности методов инструментальных переменных и конечно-частотной идентификации для активной идентификации. Показано, что последний из них дает существенно большую точность при заданном времени идентификации. Это достигается благодаря самонастройке частот испытательного сигнала.



Однако, если внешние возмущения и помехи малы (либо отсутствуют), а процессы в объекте возбуждаемы, в основном, начальными условиями, то ситуация обратная: метод инструментальных переменных дает более высокую точность.

Настоящая работа посвящена динамическому алгоритму конечно-частотной идентификации, который позволяет достичь точности идентификации, близкой к методу инструментальных переменных при малых внешних возмущениях, сохраняя преимущества метода конечно-частотной идентификации, когда процессы в объекте зависят, в основном, от внешних возмущений.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим полностью управляемый асимптотически устойчивый объект, описываемый разностным уравнением

$$\begin{aligned} y(k) + d_{n-1}y(k-1) + \dots + d_0y(k-n) = \\ = b_{n-1}u(k-1) + \dots + b_0u(k-n) + f(k-1), \\ k = k_0, k_0 + 1, k_0 + 2, \dots, \end{aligned} \quad (1)$$

где $y(k)$ — выход объекта, измеряемый в момент времени $kh \cong t$ (h — интервал дискретности измерений); $u(k)$ — управляемый (в момент времени kh) вход; $f(k)$ — внешнее возмущение — неизвестная ограниченная фильтруемая фильтром Фурье [8] функция: $|f(k)| \leq f^*$, $k \geq k_0 - 1$, где f^* — число (дополнительное ограничение на эту функцию дается в п. 2.1); $k_0 \cong t_0/h$, t_0 — начальное время. Коэффициенты d_i и b_i , $i = 0, n-1$, неизвестны.

Управляемый вход представляет собой испытательный сигнал

$$\begin{aligned} u(k) = \sum_{i=1}^n \rho_i \sin \bar{\omega}_i (k - k_u), \\ k \geq k_u \geq k_0, \end{aligned} \quad (2)$$

в котором $\rho_i > 0$ — заданные амплитуды; $\bar{\omega}_i = \omega_i h$, где ω_i , $i = \overline{1, n}$ — частоты — заданные числа, удовлетворяющие условиям

$$\begin{aligned} 0 < \omega_i h < \pi, \quad i = \overline{1, n}, \\ \omega_i \neq \omega_j, \quad i \neq j. \end{aligned} \quad (3)$$

Испытательный сигнал прикладывается к объекту в момент времени $t_u = k_u h$, до которого функция (2) принимает нулевое значение: $u(k) = 0$ при $k_0 \leq k \leq k_u$.

Задача идентификации состоит в определении оценок $\hat{d}_i$ и $\hat{b}_i$, $i = \overline{0, n-1}$, коэффициентов объекта (1) таких, чтобы выполнялись требования

$$\begin{cases} |\hat{d}_i - d_i| \leq \varepsilon_i^d |d_i|, \text{ если } d_i \neq 0 \text{ либо} \\ |\hat{d}_i| \leq \varepsilon_i^d, \text{ если } d_i = 0, \\ |\hat{b}_i - b_i| \leq \varepsilon_i^b |b_i|, \text{ если } b_i \neq 0 \text{ либо} \\ |\hat{b}_i| \leq \varepsilon_i^b, \text{ если } b_i = 0, \end{cases}$$

к относительной точности идентификации, в которых ε_i^d и ε_i^b , $i = \overline{0, n-1}$, — заданные положительные числа.

2. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ

2.1. Частотные параметры объекта

Определение 1 [8]. Набор $2n$ чисел

$$\alpha_i \cong \operatorname{Re} w(e^{j\bar{\omega}_i}), \quad \beta_i \cong \operatorname{Im} w(e^{j\bar{\omega}_i}), \quad i = \overline{1, n} \quad (4)$$

— значений передаточной функции

$$w(z) = \frac{b_{n-1}z^{n-1} + \dots + b_1z + b_0}{z^n + d_{n-1}z^{n-1} + \dots + d_1z + d_0}$$

на частотах (3), называется *частотными параметрами* объекта (1). ♦

Для экспериментального определения оценок $\hat{\alpha}_i$ и $\hat{\beta}_i$, $i = \overline{1, n}$ частотных параметров (4) ко входу объекта (1) прикладывается испытательное воздействие (2). Выход объекта подается на вход фильтра Фурье

$$\begin{aligned} \hat{\alpha}_i = \alpha_i(N) = \frac{2}{\rho_i N} \sum_{k=k_u}^{k_u+N-1} y(k) \sin \bar{\omega}_i (k - k_u), \\ \hat{\beta}_i = \beta_i(N) = \frac{2}{\rho_i N} \sum_{k=k_u}^{k_u+N-1} y(k) \cos \bar{\omega}_i (k - k_u), \\ i = \overline{1, n}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $k_u h$ — момент начала фильтрации, Nh — время фильтрации, $N = 1, 2, \dots$ Предполагается, что Nh кратно базовому периоду $T_\delta = 2\pi/\omega_\delta$, где $\omega_\delta = \min(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$.

Решение уравнения (1) имеет следующую структуру:

$$y(k) = y_x(k) + y_u(k) + y_f(k), \quad (6)$$

где

$$y_u(k) = \sum_{i=1}^n \rho_i (\alpha_i \sin \bar{\omega}_i (k - k_u) + \beta_i \cos \bar{\omega}_i (k - k_u)),$$

компоненту $y_f(k)$ образуют ненулевые внешние возмущения, компонента $y_x(k)$ — исчезающая функция: $\lim_{k \rightarrow \infty} y_x(k) = 0$. Эта функция зависит, в частности, от ненулевых начальных условий $y(k_0 - 1)$, $y(k_0 - 2)$, ..., $y(k_0 - n)$.

Пусть $l_i^\alpha(N)$ и $l_i^\beta(N)$ — выходы фильтра Фурье, при $u(k) = 0$, $k \geq k_0$ ($y_u(k) = 0$).

Определение 2 [8]. Возмущение $f(k)$, $k \geq k_0 - 1$ называется **ФФ-фильтруемым** (фильтруемым фильтром Фурье) на заданном наборе испытательных частот ω_i , $i = \overline{1, n}$, если существует время фильтрации N^*h такое, что выполняются неравенства

$$|l_i^\alpha(N)| \leq \varepsilon_i^\alpha, \quad |l_i^\beta(N)| \leq \varepsilon_i^\beta, \\ i = \overline{1, n}, \quad N \geq N^*,$$

в которых ε_i^α и ε_i^β , $i = \overline{1, n}$ — заданные числа.

Если это возмущение таково, что $\lim_{N \rightarrow \infty} l_i^\alpha(N) = \lim_{N \rightarrow \infty} l_i^\beta(N) = 0$, $i = \overline{1, n}$, то оно называется **строго ФФ-фильтруемым**. ♦

В частности, строго ФФ-фильтруемым является возмущение вида

$$f(k) = \sum_{v=0}^{\infty} f_v \sin(\bar{\omega}_v^f k + \varphi_v^f), \quad k \geq k_0 - 1, \quad (7)$$

неизвестных частот $\bar{\omega}_v^f$, таких что $|\bar{\omega}_v^f| \neq |\bar{\omega}_i|$, $i = \overline{1, n}$ и фаз φ_v^f , $v = \overline{1, \infty}$. Для того чтобы функция (7) была ограниченной, ее неизвестные амплитуды должны удовлетворять при этом неравенству $\sum_{v=0}^{\infty} |f_v| \leq f^*$, где f^* — известное число.

ФФ-фильтруемость может быть проверена экспериментально.

Оценки (5) частотных параметров сходятся [8] к истинным значениям при любых ограниченных строго ФФ-фильтруемых внешних возмущениях:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \alpha_i(N) = \alpha_i, \quad \lim_{N \rightarrow \infty} \beta_i(N) = \beta_i, \quad i = \overline{1, n}.$$

2.2. Частотные уравнения и статический алгоритм

Сформируем уравнение (так называемое тождество Безу)

$$d(q) \bar{b}(q) - b(q) \bar{d}(q) = b(q), \quad q = z^{-1}, \quad (8)$$

где искомые полиномы $\bar{b}(q) = \bar{b}_{n-1} q + \bar{b}_{n-2} q^2 + \dots + \bar{b}_1 q^{n-1} + \bar{b}_0 q^n$ и $\bar{d}(q) = \bar{d}_{n-1} q + \bar{d}_{n-2} q^2 + \dots + \bar{d}_1 q^{n-1} + \bar{d}_0 q^n$.

Это уравнение имеет единственное решение

$$\bar{d}_i = d_i \text{ и } \bar{b}_i = b_i, \quad i = \overline{0, n-1}. \quad (9)$$

Разделим уравнение (8) на $d(q)$, положим $q_i = e^{-j\bar{\omega}_i}$ и, учитывая выражение (4), получим следующую систему $2n$ уравнений:

$$\sum_{v=1}^n e^{-j\bar{\omega}_i v} \bar{b}_{n-v} - (\alpha_i + j\beta_i) \sum_{v=1}^n e^{-j\bar{\omega}_i v} \bar{d}_{n-v} = \alpha_i + j\beta_i, \\ i = \overline{1, n}. \quad (10)$$

Если объект полностью управляем, а испытательные частоты удовлетворяют условиям (3), то система линейных алгебраических уравнений (10) имеет единственное решение (9).

Статический алгоритм идентификации [8–10] состоит в определении оценок частотных параметров с помощью фильтра Фурье (5) и решения частотных уравнений (10), где $\alpha_i = \hat{\alpha}_i$ и $\beta_i = \hat{\beta}_i$, $i = \overline{1, n}$.

Этот алгоритм имеет следующий недостаток. Пусть компонента $y_x(k)$ в выражении (6) доминирует:

$$|y_x(k)| > |y_u(k) + y_f(k)|, \quad k = \overline{k_0, k_0 + N_1 - 1}.$$

В этом случае точность идентификации в момент времени $(k_0 + N_1 - 1)h$ может быть мала. Ниже приводится новый алгоритм, который лишен этого недостатка.

3. ДИНАМИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ

Умножим каждое из N уравнений

$$y(k) + \sum_{v=1}^n d_{n-v} y(k-v) = \sum_{v=1}^n b_{n-v} u(k-v) + f(k-1), \\ k = \overline{k_u, k_u + N - 1} \quad (1')$$



на модулирующие [11] функции $\sin \bar{\omega}_i(k - k_u)$, $\cos \bar{\omega}_i(k - k_u)$, $i = \overline{1, n}$ и после суммирования по k получим:

$$\begin{aligned} & \sum_{k=k_u}^{k_u+N-1} y(k) \sin \bar{\omega}_i(k - k_u) + \\ & + \sum_{v=1}^n d_{n-v} \sum_{k=k_u}^{k_u+N-1} y(k-v) \sin \bar{\omega}_i(k - k_u) = \\ & = \sum_{v=1}^n b_{n-v} \sum_{k=k_u}^{k_u+N-1} u(k-v) \sin \bar{\omega}_i(k - k_u) + \\ & + \sum_{k=k_u}^{k_u+N-1} f(k-1) \sin \bar{\omega}_i(k - k_u), \quad i = \overline{1, n}; \\ & \sum_{k=k_u}^{k_u+N-1} y(k) \cos \bar{\omega}_i(k - k_u) + \\ & + \sum_{v=1}^n d_{n-v} \sum_{k=k_u}^{k_u+N-1} y(k-v) \cos \bar{\omega}_i(k - k_u) = \\ & = \sum_{v=1}^n b_{n-v} \sum_{k=k_u}^{k_u+N-1} u(k-v) \cos \bar{\omega}_i(k - k_u) + \\ & + \sum_{k=k_u}^{k_u+N-1} f(k-1) \cos \bar{\omega}_i(k - k_u), \quad i = \overline{1, n}. \quad (11) \end{aligned}$$

Введем векторы $\mathbf{y} \cong [y(k_u) y(k_u + 1) \dots y(k_u + N - 1)]^T$, $\mathbf{f} \cong [f(k_u - 1) f(k_u) \dots f(k_u + N - 2)]^T$, $\mathbf{y}(k) \cong [y(k-1) y(k-2) \dots y(k-n)]^T$, $\mathbf{u}(k) \cong [u(k-1) u(k-2) \dots u(k-n)]^T$, $\mathbf{d} \cong [d_{n-1} \dots d_1 d_0]^T$ и $\mathbf{b} \cong [b_{n-1} \dots b_1 b_0]^T$ и матрицы

$$S \cong \frac{2}{N} \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ \sin \bar{\omega}_1 & \sin \bar{\omega}_2 & \dots & \sin \bar{\omega}_n \\ \sin \bar{\omega}_1 2 & \sin \bar{\omega}_2 2 & \dots & \sin \bar{\omega}_n 2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sin \bar{\omega}_1 (N-1) & \sin \bar{\omega}_2 (N-1) & \dots & \sin \bar{\omega}_n (N-1) \end{pmatrix},$$

$$C \cong \frac{2}{N} \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \cos \bar{\omega}_1 & \cos \bar{\omega}_2 & \dots & \cos \bar{\omega}_n \\ \cos \bar{\omega}_1 2 & \cos \bar{\omega}_2 2 & \dots & \cos \bar{\omega}_n 2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \cos \bar{\omega}_1 (N-1) & \cos \bar{\omega}_2 (N-1) & \dots & \cos \bar{\omega}_n (N-1) \end{pmatrix},$$

$Y \cong (\mathbf{y}(k_u) \mathbf{y}(k_u + 1) \dots \mathbf{y}(k_u + N - 1))^T$ и $U \cong (\mathbf{u}(k_u) \mathbf{u}(k_u + 1) \dots \mathbf{u}(k_u + N - 1))^T$.

Тогда система уравнений (11) примет вид

$$M\theta = \mathbf{v}_y + \mathbf{v}_f, \quad (12)$$

где

$$M = \begin{pmatrix} -S^T Y & S^T U \\ -C^T Y & C^T U \end{pmatrix}, \quad \mathbf{v}_y = \begin{bmatrix} S^T \mathbf{y} \\ C^T \mathbf{y} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$\theta = \begin{bmatrix} \mathbf{d} \\ \mathbf{b} \end{bmatrix} \text{ и } \mathbf{v}_f = \begin{pmatrix} -S^T \mathbf{f} \\ -C^T \mathbf{f} \end{pmatrix}.$$

Здесь на пересечении v -го столбца и i -й строки у блока $-S^T Y$ стоит элемент $-\sum_{k=k_u}^{k_u+N-1} y(k-v) \times \sin \bar{\omega}_i(k - k_u)$, у блока $S^T U$ соответственно $\sum_{k=k_u}^{k_u+N-1} u(k-v) \sin \bar{\omega}_i(k - k_u)$, у блока $-C^T Y$ стоит элемент $-\sum_{k=k_u}^{k_u+N-1} y(k-v) \cos \bar{\omega}_i(k - k_u)$, у блока $C^T U$ соответственно $\sum_{k=k_u}^{k_u+N-1} u(k-v) \cos \bar{\omega}_i(k - k_u)$; v -й элемент столбца $S^T \mathbf{y}$ имеет вид $\sum_{k=k_u}^{k_u+N-1} y(k) \sin \bar{\omega}_v(k - k_u)$, v -й элемент столбца $C^T \mathbf{y}$ соответственно $\sum_{k=k_u}^{k_u+N-1} y(k) \times \cos \bar{\omega}_v(k - k_u)$; v -й элемент столбца $-S^T \mathbf{f}$ имеет вид $-\sum_{k=k_u}^{k_u+N-1} f(k-1) \sin \bar{\omega}_v(k - k_u)$, v -й элемент столбца $-C^T \mathbf{f}$ соответственно $-\sum_{k=k_u}^{k_u+N-1} f(k-1) \times \cos \bar{\omega}_v(k - k_u)$.

Элементы матрицы M и вектора $\mathbf{v}_y$ системы уравнений (12) вычисляются по измеряемым входу и выходу объекта (1). Вектор $\mathbf{v}_f$ неизвестен, так как $f(k-1)$ не измеряется. Поэтому оценку $\hat{\theta}$ вектора

параметров объекта будем искать на основе уравнения

$$M(N)\hat{\theta} = \mathbf{v}_y(N). \quad (14)$$

Очевидно, что решение $\hat{\theta} = M^{-1}\mathbf{v}_y$ последнего существует, если $\det M \neq 0$ и совпадает с истинным значением θ при $\mathbf{v}_f = 0$.

Утверждение 1. Если внешнее возмущение строго ФФ-фильтруемо, то при $N \rightarrow \infty$ матричное уравнение (14) сходится к системе $2n$ уравнений (10). ♦

Доказательство приведено в Приложении.

Алгоритм идентификации состоит из следующих операций.

1. Формируем матрицу $M(N)$ и вектор $\mathbf{v}_y(N)$ системы (13) для каждого N , $N = 1, 2, \dots$

2. Решая систему линейных уравнений (14), вычисляем оценки $\theta(N)$ для каждого N , $N = 1, 2, \dots$

4. ПРИМЕР

Пусть имеется полностью управляемый асимптотически устойчивый объект, описываемый разностным уравнением

$$\begin{aligned} y(k) - 2,937y(k-1) + 2,877y(k-2) - \\ - 0,940y(k-3) = -9,712 \cdot 10^{-5}u(k-1) + \\ + 5,235 \cdot 10^{-6}u(k-2) + 9,674 \cdot 10^{-5}u(k-3) + \\ + 8,205 \cdot 10^{-7}f(k-1) + 3,231 \cdot 10^{-6}f(k-2) + \\ + 7,954 \cdot 10^{-7}f(k-3), \quad k = \overline{1, N}, \end{aligned} \quad (15)$$

с возмущением $f(k) = \text{sign}(\sin 0,0275k)$.

На вход объекта подается испытательный сигнал

$$u(k) = 3(\sin 0,002k + \sin 0,01k + \sin 0,05k).$$

Задача состоит в том, чтобы по известным (полученным в результате моделирования уравнения (15)) значениям $y(k)$ и $u(k)$ найти оценки коэффициентов передаточной функции объекта.

Примечание 1. Разностное уравнение (15) соответствует дифференциальному уравнению [12] $\ddot{y} + 6,2\ddot{y} + 26,2\dot{y} + 5y = -2\dot{u} + 5u + f$ и получено путем дискретизации последнего с интервалом дискретности $h = 0,01$ с. Для сравнения результатов идентификации с коэффициентами передаточной функции

$$w(s) = \frac{-2s + 5}{s^3 + 6,2s^2 + 26,2s + 5}$$

дискретное описание объекта преобразуется к непрерывному. ♦

Численные эксперименты проводились в системе MATLAB.

Первый эксперимент. Пусть начальные условия $y(0) = y(-1) = 0$ и $y(-2) = 1$. Передаточная функция идентифицированного объекта при $N = 75$ имеет вид:

$$\hat{w}(s) = \frac{-6,01 \cdot 10^{-3}s^2 - 1,937s + 4,905}{s^3 + 6,1995s^2 + 26,198s + 4,983}.$$

Второй эксперимент. Используем при тех же начальных условиях статический алгоритм идентификации из п. 2.2. Передаточная функция идентифицированного объекта при $N = 75$ имеет вид:

$$\hat{w}(s) = \frac{566,74s^2 - 217s + 114,8}{s^3 + 2,947s^2 + 4,142s + 0,2298}.$$

Примечание 2. Точность идентификации в первом эксперименте с помощью статического алгоритма достигается при $N = 94\,500$ (при этом приходится ждать 31,5 с, пока «успокоится» переходный процесс). Передаточная функция в этом случае имеет вид

$$\hat{w}(s) = \frac{0,01598s^2 - 2,083s + 5,197}{s^3 + 6,354s^2 + 27,17s + 5,209}.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой работе построен динамический алгоритм конечно-частотной идентификации. Он позволяет получать более высокую точность идентификации в случае, когда в решении уравнения объекта доминирует компонента $y_x(k)$, зависящая от начальных условий. Если в решении доминирует компонента $y_f(k)$, то точность результатов идентификации, полученных статическим и динамическим алгоритмами, близка.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Доказательство утверждения 1. Введем функции

$$c.(\bar{\omega}_i, N) \cong \sum_{k=k_u}^{k_u+N-1} \bullet(k) e^{-j\bar{\omega}_i(k-k_u)},$$

$$c^{(v)}(\bar{\omega}_i, N) \cong \sum_{k=k_u}^{k_u+N-1} \bullet(k-v) e^{-j\bar{\omega}_i(k-k_u)}, \quad i, v = \overline{1, n},$$

значок $\bullet$ в определении которых используется для компактности как один из трех символов (y , u либо f).

Эти функции связаны как

$$c^{(v)}(\bar{\omega}_i, N) = c.(\bar{\omega}_i, N) e^{-j\bar{\omega}_i v} + \delta^{(v)}(\bar{\omega}_i, N), \quad (\text{П1})$$



где

$$\delta_{\cdot}^{(v)}(\bar{\omega}_i, N) \sum_{k=k_u}^{k_u+v-1} \cdot (k-v) e^{-j\bar{\omega}_i(k-k_u)} - \\ - \sum_{k=k_u+N}^{k_u+N+v-1} \cdot (k-v) e^{-j\bar{\omega}_i(k-k_u)}, \quad i, v = \overline{1, n}.$$

Преобразованная с учетом формулы Эйлера система (11) в этих обозначениях примет вид

$$c_y(\bar{\omega}_i, N) + \sum_{v=1}^n d_{n-v} c_y^{(v)}(\bar{\omega}_i, N) = \\ = \sum_{v=1}^n b_{n-v} c_u^{(v)}(\bar{\omega}_i, N) + c_f^{(1)}(\bar{\omega}_i, N), \quad i = \overline{1, n}. \quad (\text{П2})$$

Обозначим

$$w^{(N)}(e^{j\bar{\omega}_i}) = \frac{c_y(\bar{\omega}_i, N)}{c_u(\bar{\omega}_i, N)}, \quad w_f^{(N)}(e^{j\bar{\omega}_i}) = \frac{c_f(\bar{\omega}_i, N)}{c_u(\bar{\omega}_i, N)}, \\ \delta_{d,v}^{(N)}(e^{j\bar{\omega}_i}) = \frac{\delta_v^{(v)}(\bar{\omega}_i, N)}{c_y(\bar{\omega}_i, N)}, \quad \delta_{b,v}^{(N)}(e^{j\bar{\omega}_i}) = \frac{\delta_u^{(v)}(\bar{\omega}_i, N)}{c_u(\bar{\omega}_i, N)}, \\ \delta_{m,1}^{(N)}(e^{j\bar{\omega}_i}) = \frac{\delta_f^{(1)}(\bar{\omega}_i, N)}{c_f(\bar{\omega}_i, N)}. \quad (\text{П3})$$

Система (П2) с учетом выражения (П1) в обозначениях (П3) примет вид

$$-w^{(N)}(e^{j\bar{\omega}_i}) \sum_{v=1}^n (e^{-j\bar{\omega}_i v} + \delta_{d,v}^{(N)}(e^{j\bar{\omega}_i})) d_{n-v} + \\ + \sum_{v=1}^n (e^{-j\bar{\omega}_i v} + \delta_{b,v}^{(N)}(e^{j\bar{\omega}_i})) b_{n-v} = w^{(N)}(e^{j\bar{\omega}_i}) - \\ - w_f^{(N)}(e^{j\bar{\omega}_i})(e^{-j\bar{\omega}_i} + \delta_{m,1}^{(N)}(e^{j\bar{\omega}_i})), \quad i = \overline{1, n}. \quad (\text{П4})$$

Выпишем уравнение (10) с учетом формул (4) и (9):

$$-w(e^{j\bar{\omega}_i}) \sum_{v=1}^n e^{-j\bar{\omega}_i v} d_{n-v} + \sum_{v=1}^n e^{-j\bar{\omega}_i v} b_{n-v} = w(e^{j\bar{\omega}_i}), \\ i = \overline{1, n}. \quad (\text{П5})$$

Нетрудно видеть, что уравнения (П4) и (П5) совпадают, если

- (a) $\lim_{N \rightarrow \infty} w^{(N)}(e^{j\bar{\omega}_i}) = w(e^{j\bar{\omega}_i})$,
- (b) $\lim_{N \rightarrow \infty} w_f^{(N)}(e^{j\bar{\omega}_i}) = 0$,
- (c) $\lim_{N \rightarrow \infty} \delta_{d,v}^{(N)}(e^{j\bar{\omega}_i}) = 0$,
- (d) $\lim_{N \rightarrow \infty} \delta_{b,v}^{(N)}(e^{j\bar{\omega}_i}) = 0$ и
- (e) $\lim_{N \rightarrow \infty} \delta_{m,1}^{(N)}(e^{j\bar{\omega}_i}) < \infty$.

Доказательство каждого из этих соотношений начинается с индекса, обозначающего это соотношение.

(a) Подставим выражение (6) в формулу для $c_y(\bar{\omega}_i, N)$:

$$c_y(\bar{\omega}_i, N) = \sum_{k=k_u}^{k_u+N-1} y(k) e^{-j\bar{\omega}_i(k-k_u)} = \\ = c_{yx}(\bar{\omega}_i, N) + c_{yu}(\bar{\omega}_i, N) + c_{yf}(\bar{\omega}_i, N), \quad i = \overline{1, n}.$$

В силу асимптотической устойчивости объекта имеем

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{c_{yx}(\bar{\omega}_i, N)}{N} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=k_u}^{k_u+N-1} y_x(k) e^{-j\bar{\omega}_i(k-k_u)} = 0, \\ i = \overline{1, n},$$

а в силу строгой ФФ-фильтруемости внешнего возмущения соответственно

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{c_{yf}(\bar{\omega}_i, N)}{N} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=k_u}^{k_u+N-1} y_f(k) e^{-j\bar{\omega}_i(k-k_u)} = 0, \\ i = \overline{1, n}.$$

Нетрудно видеть, что

$$\frac{c_{yu}(\bar{\omega}_i, N)}{N} = \frac{1}{N} \sum_{k=k_u}^{k_u+N-1} y_u(k) e^{-j\bar{\omega}_i(k-k_u)} = \\ = \rho_i \left(\frac{\beta_i - j\alpha_i}{2} + \frac{\beta_i + j\alpha_i}{2N} \cdot \frac{e^{-j2\bar{\omega}_i N} - 1}{e^{-j2\bar{\omega}_i} - 1} \right) + \\ + \sum_{\substack{v=1 \\ v \neq i}}^n \rho_v \left(\frac{\beta_v - j\alpha_v}{2N} \cdot \frac{e^{j(\bar{\omega}_v - \bar{\omega}_i)N} - 1}{e^{j(\bar{\omega}_v - \bar{\omega}_i)} - 1} + \frac{\beta_v + j\alpha_v}{2N} \cdot \frac{e^{-j(\bar{\omega}_v + \bar{\omega}_i)N} - 1}{e^{-j(\bar{\omega}_v + \bar{\omega}_i)} - 1} \right).$$

Аналогично, можно показать, что

$$\frac{c_u(\bar{\omega}_i, N)}{N} = \frac{\rho_i}{2j} \left(1 - \frac{1}{N} \cdot \frac{e^{-j2\bar{\omega}_i N} - 1}{e^{-j2\bar{\omega}_i} - 1} \right) + \\ + \sum_{\substack{v=1 \\ v \neq i}}^n \frac{\rho_v}{2jN} \left(\frac{e^{j(\bar{\omega}_v - \bar{\omega}_i)N} - 1}{e^{j(\bar{\omega}_v - \bar{\omega}_i)} - 1} + \frac{e^{-j(\bar{\omega}_v + \bar{\omega}_i)N} - 1}{e^{-j(\bar{\omega}_v + \bar{\omega}_i)} - 1} \right).$$

Таким образом,

$$\lim_{N \rightarrow \infty} w^{(N)}(e^{j\bar{\omega}_i}) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{c_y(\bar{\omega}_i, N)}{c_u(\bar{\omega}_i, N)} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{c_{yu}(\bar{\omega}_i, N)/N}{c_u(\bar{\omega}_i, N)/N} = \\ = \rho_i \frac{\beta_i - j\alpha_i}{2} / \frac{\rho_i}{2j} = \alpha_i + j\beta_i = w(e^{j\bar{\omega}_i}), \quad i = \overline{1, n}.$$

(b) В силу строгой ФФ-фильтруемости функция $c_f(\bar{\omega}_i, N)$, $i = \overline{1, n}$ ограничена и следовательно

$$\lim_{N \rightarrow \infty} w_f^{(N)}(e^{j\bar{\omega}_i}) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{c_f(\bar{\omega}_i, N)}{c_u(\bar{\omega}_i, N)} = \\ = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{c_f(\bar{\omega}_i, N)/N}{c_u(\bar{\omega}_i, N)/N} = 0, \quad i = \overline{1, n}.$$

(с) Предельное равенство

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \delta_{d,v}^{(N)}(e^{j\bar{\omega}_i}) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\delta_v^{(v)}(\bar{\omega}_i, N)}{c_y(\bar{\omega}_i, N)} =$$

$$= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\delta_{yx}^{(v)}(\bar{\omega}_i, N)/N + \delta_{yu}^{(v)}(\bar{\omega}_i, N)/N + \delta_{yf}^{(v)}(\bar{\omega}_i, N)/N}{c_{yx}(\bar{\omega}_i, N)/N + c_{yu}(\bar{\omega}_i, N)/N + c_{yf}(\bar{\omega}_i, N)/N},$$

$$i, v = \overline{1, n}.$$

В силу асимптотической устойчивости объекта (1):

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\delta_{yx}^{(v)}(\bar{\omega}_i, N)}{N} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=k_u}^{k_u+v-1} e^{-j\bar{\omega}_i(k-k_u)} (y_x(k-v) -$$

$$- y_x(N+k-v) e^{-j\bar{\omega}_i N}) = 0, \quad i, v = \overline{1, n}.$$

В силу ФФ-фильтруемости внешнего возмущения:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\delta_{yf}^{(v)}(\bar{\omega}_i, N)}{N} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=k_u}^{k_u+v-1} e^{-j\bar{\omega}_i(k-k_u)} (y_f(k-v) -$$

$$- y_f(N+k-v) e^{-j\bar{\omega}_i N}) = 0, \quad i, v = \overline{1, n}.$$

Из ограниченности функции

$$\delta_{yu}^{(v)}(\bar{\omega}_i, N) = \sum_{k=k_u}^{k_u+v-1} e^{-j\bar{\omega}_i(k-k_u)} (y_u(k-v) -$$

$$- y_u(N+k-v) e^{-j\bar{\omega}_i N}), \quad i, v = \overline{1, n},$$

следует

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \delta_{d,v}^{(N)}(e^{j\bar{\omega}_i}) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\delta_{yu}^{(v)}(\bar{\omega}_i, N)/N}{c_{yu}(\bar{\omega}_i, N)/N} = 0, \quad i, v = \overline{1, n}.$$

(д) Из ограниченности функции $\delta_u^{(v)}(\bar{\omega}_i, N)$ следует:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \delta_{b,v}^{(N)}(e^{j\bar{\omega}_i}) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\delta_u^{(v)}(\bar{\omega}_i, N)}{c_u(\bar{\omega}_i, N)} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\delta_u^{(v)}(\bar{\omega}_i, N)/N}{c_u(\bar{\omega}_i, N)/N} = 0,$$

$$i, v = \overline{1, n}.$$

(е) Из ограниченности функции $\delta_f^{(1)}(\bar{\omega}_i, N) = f(k_u -$
 $- 1) - f(k_u + N - 1) e^{-j\bar{\omega}_i N}$, $i = \overline{1, n}$, следует:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} w_f^{(N)}(e^{j\bar{\omega}_i}) \delta_{m,1}^{(N)}(e^{j\bar{\omega}_i}) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\delta_f^{(1)}(\bar{\omega}_i, N)}{c_u(\bar{\omega}_i, N)} =$$

$$= \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\delta_f^{(1)}(\bar{\omega}_i, N)/N}{c_u(\bar{\omega}_i, N)/N} = 0, \quad i = \overline{1, n}.$$

Утверждение 1, таким образом, доказано.

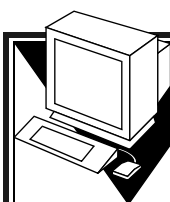
ЛИТЕРАТУРА

1. Фомин В.Н., Фрадков А.Л., Якубович В.А. Адаптивное управление динамическими объектами. — М.: Наука, 1981. — 448 с.
2. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. — М.: Наука, 1991. — 432 с.
3. Граничин О.Н., Поляк Б.Т. Рандомизированные алгоритмы оценивания и оптимизации при почти произвольных помехах. — М.: Наука, 2003. — 291 с.
4. Бунич А.Л., Бахтадзе Н.Н. Синтез и применение дискретных систем управления с идентификатором. — М.: Наука, 2003. — 232 с.
5. Alexandrov A.G. Finite-frequency method of identification // Preprints of 10th IFAC Symposium on System Identification. — Copenhagen, Denmark, 1994. — Vol. 2. — P. 523–527.
6. Wong K.Y., Polak E. Identification of linear discrete time systems using the instrumental variable approach // IEEE Trans. Automat. Control. — 1967. — Vol. AC-12. — P. 707–718.
7. Александров А.Г., Орлов Ю.Ф. Сравнение двух методов идентификации при неизвестных ограниченных возмущениях // Автоматика и телемеханика. — 2005. — Т. 66, № 10. — С. 128–147.
8. Александров А.Г. Конечн-частотная идентификация дискретных объектов // Тр. 6-го Санкт-Петербургского симпозиума по теории адаптивных систем, посвященного памяти Я.З. Цыпкина. SPAS'99. — СПб., 7–9 сентября 1999. — Т. 2. — С. 5–8.
9. Alexandrov A.G., Orlov Yu.F. Frequency adaptive control of multivariable plants // Preprints of the 15th Triennial World Congress of the IFAC. — Barcelona, Spain, 21–26 July 2002. On CD-ROM T-Th-M03-3.
10. Alexandrov A.G. Finite-frequency identification: selftuning of test signal // Preprints of the 16th IFAC World Congress. — Prague, Czech Republic, 3–8 July 2005, CD-ROM.
11. Shinbrot M. On the analysis of linear and nonlinear systems // Trans. ASME. — 1957. — Vol. 79. — P. 547–552.
12. Graebe S.F. Robust and adaptive control of an unknown plant: A benchmark of new format // Preprints of 12th World Congress of IFAC. — Sydney, Australia, 1993. — Vol. 3. — P. 165–170.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Ф.Ф. Пащенко.

Александров Альберт Георгиевич — д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, ☎(495) 334-76-41, ✉alex7@ipu.rssi.ru,

Орлов Юрий Феликсович — д-р физ.-мат. наук, профессор, Электростальский политехнический институт, ☎(49657) 5-36-55, ✉yu_orlov@mail.ru.



Внимание!

Наш новый адрес в Интернете: <http://pu.mtas.ru>

Редакция



ДОСТАТОЧНЫЕ УСЛОВИЯ ГРУБОСТИ НЕАВТОНОМНЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ В СМЫСЛЕ СОХРАНЕНИЯ ХАРАКТЕРА УСТОЙЧИВОСТИ

В.П. Жуков

Рассмотрены условия, при которых характер устойчивости состояния равновесия неавтономной нелинейной динамической системы произвольного порядка ляпуновского типа не изменяется при достаточно малых линейных и нелинейных возмущениях ее правой части (грубость в смысле сохранения характера устойчивости). Нелинейные члены правых частей уравнений невозмущенной системы и нелинейные возмущения этих правых частей считаются принадлежащими широкому классу нелинейных функций, зависящих в общем случае не только от фазовых переменных, но и от времени; этот класс включает в себя как аналитические (по фазовым переменным), так и различных типов неаналитические функции. Приведены достаточные условия указанной грубости.

Ключевые слова: нелинейная динамическая система, грубость в смысле сохранения характера устойчивости.

ВВЕДЕНИЕ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Впервые определение грубости (в смысле структурной устойчивости) для автономных нелинейных динамических систем было дано в работе [1]. Достаточные и необходимые условия такой грубости для автономных систем второго порядка при аналитичности правых частей этих систем и аналитичности возмущающих функций приведены в работах [1–3]. Подробно вопросы структурной устойчивости рассмотрены в работе [4]. Иной смысл имеет определение грубости свойств динамических систем, данное в работе [5]. Определения и условия структурной устойчивости систем [1, 4, 6, 7] связаны с требованием существования гомеоморфизма (взаимно однозначного и взаимно непрерывного преобразования), обеспечивающего топологическую эквивалентность [8] фазовых портретов невозмущенной и возмущенной систем в некоторой окрестности состояния равновесия. Это требование существенно осложняет нахождение и применение условий структурной устойчивости.

Если состояние равновесия невозмущенной динамической системы имеет один из возможных характеров устойчивости (асимптотическая устойчи-

вость, неасимптотическая устойчивость, неустойчивость) и нас интересуют лишь условия, при которых состояние равновесия возмущенной системы будет иметь такой же характер устойчивости при достаточно малых возмущениях, то возникает понятие грубости динамической системы в смысле сохранения характера устойчивости. Определение такой грубости для рассматриваемых в данной работе классов неавтономных нелинейных динамических систем и классов возмущающих функций дано далее в § 1.

Условие грубости в смысле сохранения характера устойчивости представляет для практических целей исследования динамических систем, в частности, систем управления, пожалуй, больший интерес, чем условия грубости в смысле структурной устойчивости, обеспечивающие сохранение топологического типа фазового портрета. Кроме того, первое из этих условий грубости проще в применении, так как в отличие от второго условия не требует существования гомеоморфизма, обуславливающего топологическую эквивалентность фазовых портретов невозмущенной и возмущенной систем.

Условия грубости в смысле сохранения характера устойчивости для автономных нелинейных

динамических систем $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \varphi(\mathbf{x})$, $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$, при предположении, что компоненты нелинейных функций $\varphi(\mathbf{x})$ и нелинейных возмущений $\varphi_1(\mathbf{x})$ правой части этих систем являются аналитическими функциями, рассматривались в работе [9].

Цель данной статьи заключается в получении условий указанной грубости для неавтономных нелинейных динамических систем $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \varphi(\mathbf{x}, t)$, $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$, при предположении, что компоненты нелинейных по $\mathbf{x}$ функций $\varphi(\mathbf{x}, t)$ и нелинейных по x возмущений $\varphi_1(\mathbf{x}, t)$ правой части этих систем принадлежат не только к аналитическим по $\mathbf{x}$ функциям (при фиксированных значениях $t \geq 0$); т. е. условия грубости рассматриваются для более широкого класса нелинейных возмущений и более широкого класса исходных (невозмущенных) нелинейных систем.

1. УСЛОВИЯ ГРУБОСТИ НЕАВТОНОМНЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Условия грубости будем рассматривать для класса неавтономных нелинейных систем ляпуновского типа

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \varphi(\mathbf{x}, t), \quad \mathbf{x} \in \mathbf{R}^n, \quad (1)$$

или

$$\dot{\mathbf{x}} = \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j + \varphi_i(x_1, \dots, x_n, t), \quad i = 1, \dots, n,$$

где a_{ij} , $i, j = 1, \dots, n$ — постоянные элементы квадратной матрицы $\mathbf{A}$, $\varphi_i(\mathbf{x}, t)$, $\varphi_i(0, t) = 0$, $i = 1, \dots, n$ — компоненты нелинейной (по $\mathbf{x}$) векторной функции $\varphi(\mathbf{x}, t)$, непрерывно зависящей от t и обеспечивающей в некоторой компактной окрестности ε точки равновесия $\mathbf{x} = 0$ системы (1) существование и единственность максимально продолженно-го решения этой системы.

Пусть функции $\varphi_i(\mathbf{x}, t)$ удовлетворяют в окрестности ε ограничительным условиям следующего вида:

$$|\varphi_i(\mathbf{x}, t)| \leq w(\mathbf{x}), \quad i = 1, \dots, n, \quad t \geq 0, \quad \mathbf{x} \in \varepsilon \subset \mathbf{R}^n, \quad (2)$$

где $w(\mathbf{x}) \in \mathbf{C}_x^1$ — некоторая скалярная непрерывно дифференцируемая определенно положительная функция ($w(0) = 0$, $w(\mathbf{x}) > 0$) при $\mathbf{x} \in \varepsilon$, например, определенно положительная квадратичная форма. Условия (2) означают равномерную ограниченность по t функций $|\varphi_i(\mathbf{x}, t)|$.

Из соотношений (2) следуют соотношения

$$\lim_{\mathbf{x} \rightarrow \infty} \frac{|\varphi_i(\mathbf{x}, t)|}{|\mathbf{x}|} = 0, \quad i = 1, \dots, n, \quad t \geq 0, \quad \mathbf{x} \in \varepsilon \subset \mathbf{R}^n. \quad (3)$$

Действительно, так как функция $w(\mathbf{x})$ непрерывно дифференцируема ($w(\mathbf{x}) \in \mathbf{C}_x^1$), то ее приращение $\Delta w(\mathbf{x}) = w(\mathbf{x}) - w(0) = w(\mathbf{x})$ при переходе из точки $(\mathbf{x} = 0) \in \varepsilon$ в точку $(\mathbf{x} \neq 0) \in \varepsilon$ можно представить [10, 11] в виде

$$\Delta w(\mathbf{x}) = w(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^n x_j \frac{\partial w(\mathbf{x})}{\partial x_j} \Big|_{\mathbf{x}=0} + o(\mathbf{x}), \quad \lim_{\mathbf{x} \rightarrow \infty} \frac{o(\mathbf{x})}{|\mathbf{x}|} = 0. \quad (4)$$

Непрерывно дифференцируемая функция $w(\mathbf{x})$ является определенно положительной ($w(0) = 0$, $w(\mathbf{x}) > 0$ при $(\mathbf{x} \in \varepsilon) \neq 0$) и, следовательно, в точке $\mathbf{x} = 0$ имеет минимум, вследствие чего

$$\frac{\partial w(\mathbf{x})}{\partial x_j} \Big|_{\mathbf{x}=0} = 0, \quad j = 1, \dots, n. \quad (5)$$

Учитывая равенства (5), из соотношения (4) имеем $w(\mathbf{x}) = o(\mathbf{x})$, $\lim_{\mathbf{x} \rightarrow \infty} \frac{o(\mathbf{x})}{|\mathbf{x}|} = 0$ или

$$\lim_{\mathbf{x} \rightarrow \infty} \frac{w(\mathbf{x})}{|\mathbf{x}|} = 0. \quad (6)$$

Из соотношения (6), учитывая условия (2), следуют, наконец, соотношения (3), справедливые в множестве $\varepsilon \times [0, \infty)$ при любом пути, обеспечивающем стремление $\mathbf{x}$ к нулю. Эти соотношения (3) означают, что рассматриваемые функции $\varphi_i(\mathbf{x}, t)$, $i = 1, \dots, n$ при любом фиксированном $t \geq 0$ являются нелинейными по $\mathbf{x}$ функциями, не содержащими линейных по $\mathbf{x}$ составляющих.

Условиям (2) так же, как и следующим из них условиям (3), удовлетворяет широкий класс нелинейных по $\mathbf{x}$ функций $\varphi_i(\mathbf{x}, t)$, содержащий как аналитические по $\mathbf{x}$, так и различного типа неаналитические функции: непрерывно дифференцируемые любое конечное число раз, непрерывные.

При исследовании грубости возмущение правой части исходной (невозмущенной) нелинейной системы (1) будем рассматривать в виде суммы линейного $\mathbf{A}'\mathbf{x}$ и нелинейного $\varphi_i(\mathbf{x}, t)$ возмущений. Возмущенная система соответственно будет иметь вид:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \varphi(\mathbf{x}, t) + \mathbf{A}'\mathbf{x} + \varphi^1(\mathbf{x}, t), \quad \mathbf{x} \in \mathbf{R}^n, \quad (7)$$



где квадратная матрица $\mathbf{A}'$ имеет постоянные элементы a'_{ij} ($i, j = 1, \dots, n$), которые при исследовании условий грубости нелинейных систем (1) будем считать достаточно малыми. Пусть векторная функция $\phi^1(\mathbf{x}, t)$ удовлетворяет в окрестности ε ограничительным условиям, которые аналогичны условиям (2):

$$|\phi_i^1(\mathbf{x}, t)| \leq w_b(\mathbf{x}), \quad i = 1, \dots, n, \quad t \geq 0, \\ \mathbf{x} \in \varepsilon \subset \mathbf{R}^n, \quad (8)$$

где $w_b(\mathbf{x}) \in C_x^1$ — некоторая скалярная непрерывно дифференцируемая определенно положительная функция ($w_b(0) = 0$, $w_b(\mathbf{x}) > 0$ при $\mathbf{x} \in \varepsilon$). Поэтому для функций $\phi_i^1(\mathbf{x}, t)$ можно получить соотношения, аналогичные соотношениям (3):

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{|\phi_i^1(\mathbf{x}, t)|}{x} = 0, \quad i = 1, \dots, n, \quad t \geq 0, \\ \mathbf{x} \in \varepsilon \subset \mathbf{R}^n. \quad (9)$$

Из условий (8) и соответственно из условий (9), очевидно, следует, что рассматривается широкий класс нелинейных возмущений $\phi_i^1(\mathbf{x}, t)$, аналогичных классу нелинейных функций $\phi_i(\mathbf{x}, t)$; при $w_b(\mathbf{x}) = w(\mathbf{x})$ эти классы совпадают. Малость возмущений $\phi_i^1(\mathbf{x}, t)$ в окрестности ε в данной статье при рассмотрении условий грубости достаточно рассматривать в C -метрике, что видно из доказательства приводимой ниже теоремы.

При исследовании условий грубости нелинейных систем (1) будем исходить из следующего определения.

Определение. Нелинейная неавтономная система (1), удовлетворяющая условиям (2) является грубой (в смысле сохранения характера устойчивости точки равновесия $\mathbf{x} = 0$ этой системы) по отношению к рассматриваемому классу возмущений $\mathbf{A}'\mathbf{x} + \phi^1(\mathbf{x}, t)$, характеризующихся тем, что нелинейные возмущения $\phi^1(\mathbf{x}, t)$ удовлетворяют условиям (8), а линейные возмущения $\mathbf{A}'\mathbf{x}$ имеют достаточно малые коэффициенты матрицы $\mathbf{A}'$, если при любых указанных возмущениях характер устойчивости точки равновесия $\mathbf{x} = 0$ возмущенной системы (7) остается таким же, как у точки равновесия $\mathbf{x} = 0$ невозмущенной системы (1). ♦

Имеет место следующая теорема, дающая достаточные условия грубости нелинейных неавтономных систем (1) в смысле данного определения.

Теорема. Нелинейная неавтономная система (1), у которой нелинейные функции $\phi_i(\mathbf{x}, t)$ удовлетворя-

ют условиям (2), является по отношению к рассматриваемому классу возмущений $\mathbf{A}'\mathbf{x} + \phi^1(\mathbf{x}, t)$ грубой в смысле сохранения характера устойчивости ее точки равновесия $\mathbf{x} = 0$, если либо все корни характеристического многочлена матрицы $\mathbf{A}$ расположены левее мнимой оси комплексной плоскости, либо хотя бы один корень расположен правее этой оси при любом расположении остальных корней. В первом случае грубой является асимптотически устойчивая нелинейная система (1), во втором случае груба неустойчивая система (1). ♦

Доказательство теоремы приведено в Приложении.

Таким образом, из теоремы следует, что асимптотически устойчивая нелинейная система (1) груба по отношению к рассматриваемым возмущениям $\mathbf{A}'\mathbf{x} + \phi^1(\mathbf{x}, t)$, если ее линеаризованная система

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n) \quad (10)$$

асимптотически устойчива, а неустойчивая система (1) груба по отношению к указанным возмущениям, если ее линеаризованная система (10) неустойчива из-за наличия правых корней (т. е. корней с положительной действительной частью) характеристического многочлена матрицы $\mathbf{A}$. Расположение корней вне мнимой оси является достаточным условием грубости нелинейной системы (1).

Теорема распространяется, конечно, и на частный случай, когда в уравнении (1) $\phi(\mathbf{x}, t) = \phi(\mathbf{x})$; в этом случае условия (2), очевидно, имеют вид: $\phi_i(\mathbf{x}) \leq w(\mathbf{x})$, $i = 1, \dots, n$, где $w(\mathbf{x})$ по-прежнему является некоторой непрерывно дифференцируемой определенно положительной функцией.

При доказательстве теоремы используется следующая лемма, аналогичная теоремам первого метода Ляпунова, но соответствующая случаю, когда в уравнении (1) $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \phi(\mathbf{x}, t)$ ($\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$) нелинейная функция $\phi(\mathbf{x}, t)$ принадлежит классу функций, удовлетворяющих условиям (2), который существенно шире класса аналитических функций, рассматриваемых в первом методе.

Лемма. Пусть скалярные нелинейные функции $\phi_i(\mathbf{x}, t)$, $i = 1, \dots, n$, являющиеся компонентами векторной функции $\phi(\mathbf{x}, t)$, входящей в правую часть нелинейной системы (1), удовлетворяют условиям (2) и, следовательно, условиям (3). Тогда достаточным условием асимптотической устойчивости точки равновесия $\mathbf{x} = 0$ неавтономной нелинейной системы (1) при любых функциях $\phi_i(\mathbf{x}, t)$ из рассматриваемого класса является отрицательность вещественных частей всех корней характеристического полинома матрицы $\mathbf{A}$, а достаточным условием неустойчивости точки равновесия $\mathbf{x} = 0$ этой системы при любых

функциях $\varphi_i(\mathbf{x}, t)$ из того же класса является положительность вещественной части хотя бы одного корня характеристического полинома матрицы $\mathbf{A}$.

Доказательство леммы приведено в Приложении.

Рассмотрим пример применения теоремы. Исследуем на грубость в смысле сохранения характера устойчивости следующую нелинейную неавтономную систему

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2 + x_3^2(2 - e^{-t}), \\ \dot{x}_2 &= -x_1 + x_2^3, \\ \dot{x}_3 &= x_3 + x_1^5 \frac{1}{1 + e^{-t}}.\end{aligned}\quad (11)$$

Точка $\mathbf{x} = 0$ является точкой равновесия этой системы. Докажем вначале, что существует такая непрерывно дифференцируемая определенно положительная функция $w(\mathbf{x})$, при которой нелинейные функции

$$\begin{aligned}\varphi_1(\mathbf{x}, t) &= x_3^2(2 - e^{-t}), \quad \varphi_2(\mathbf{x}, t) = x_2^3, \\ \varphi_3(\mathbf{x}, t) &= x_1^5 \frac{1}{1 + e^{-t}}\end{aligned}$$

удовлетворяют условиям (2), определяющим возможность применения теоремы. Такой функцией является функция $w(\mathbf{x}) = 2(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2)$, ибо в шаровой окрестности $(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2) \leq 1$ точки $\mathbf{x} = 0$ для системы (11) выполняется условие (2):

$$|\varphi_1(\mathbf{x}, t)| = x_3^2(2 - e^{-t}) \leq w(\mathbf{x}),$$

$$|\varphi_2(\mathbf{x}, t)| = |x_2^3| \leq w(\mathbf{x}),$$

$$|\varphi_3(\mathbf{x}, t)| = |x_1^5| \frac{1}{1 + e^{-t}} \leq w(\mathbf{x}),$$

где $w(\mathbf{x}) = 2(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2)$. Следовательно, теорема применима для исследования грубости системы (11). Так как точка равновесия $\mathbf{x} = 0$ линейной системы $\dot{x}_1 = x_2$, $\dot{x}_2 = -x_1$, $\dot{x}_3 = x_3$, полученной линеаризацией нелинейной системы (11), неустойчива (ибо этой линеаризованной системе соответствует один корень справа от мнимой оси), то, согласно теореме, точка равновесия $\mathbf{x} = 0$ нелинейной системы (11) будет грубой в смысле сохранения характера устойчивости по отношению к классу возмущений $\mathbf{A}'\mathbf{x} + \varphi^1(\mathbf{x}, t)$, где матрица $\mathbf{A}'$ имеет достаточно малые элементы, а нелинейное возму-

щение $\varphi^1(\mathbf{x}, t)$ удовлетворяет условиям (8). Это означает, что, так как согласно лемме система (11) неустойчива, то неустойчивой будет и система, полученная возмущением системы (11).

ПРИЛОЖЕНИЕ

Доказательство леммы. Покажем сначала, что отрицательность вещественных частей всех корней характеристического полинома матрицы $\mathbf{A}$ является достаточным условием асимптотической устойчивости точки равновесия $\mathbf{x} = 0$ нелинейной системы (1) при любых функциях $\varphi_i(\mathbf{x}, t)$, удовлетворяющим условиям (2), и, следовательно, условиям (3). Известно, что если все указанные корни имеют отрицательную вещественную часть, то уравнение в частных производных

$$\sum_{i=1}^n (a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n) \frac{\partial V}{\partial x_i} = |\mathbf{x}|^2, \quad |\mathbf{x}|^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2, \quad (\text{П.1})$$

имеет своим решением определенно отрицательную квадратичную форму V переменных $x_1, x_2, \dots, x_n$ [12]. Левая часть уравнения (П.1) представляет собой производную в силу линейной системы (10) $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x}$ от неизвестной функции $V(\mathbf{x})$. Производная в силу нелинейной системы (1) от определенно отрицательной квадратичной формы V будет, очевидно, иметь вид:

$$\frac{dV}{dt} = |\mathbf{x}|^2 + \sum_{i=1}^n \frac{\partial V}{\partial x_i} \varphi_i(\mathbf{x}, t). \quad (\text{П.2})$$

Эта производная в точке $\mathbf{x} = 0$ равна нулю.

Преобразуем правую часть соотношения (П.2) так, чтобы доказательство достаточности условий леммы оказалось возможным не только для аналитических функций $\varphi_i(\mathbf{x}, t)$, которые рассматривал Ляпунов, но и для всяких функций $\varphi_i(\mathbf{x}, t)$, удовлетворяющих условиям (2) и, следовательно, условиям (3), т. е. также для непрерывных и непрерывно дифференцируемых конечное число раз функций. Для этого, вынося $|\mathbf{x}|^2$ в правой части соотношения (П.2) за скобку в виде множителя и используя тождество $1 = (1 - \alpha) + \alpha$, где α — любое положительное число меньше единицы ($0 < \alpha < 1$), преобразуем соотношение (П.2) к виду

$$\frac{dV}{dt} = (1 - \alpha)|\mathbf{x}|^2 + \left[\alpha + \sum_{i=1}^n \frac{\partial V}{\partial x_i} \frac{1}{|\mathbf{x}|} \frac{\varphi_i(\mathbf{x}, t)}{|\mathbf{x}|} \right] |\mathbf{x}|^2. \quad (\text{П.3})$$

Используя соотношение (П.3), покажем, что производная dV/dt как функция аргументов $\mathbf{x}$ и t является в некоторой окрестности точки $\mathbf{x} = 0$ определенно положительной, так как она удовлетворяет в этой окрестности условию [5]:

$$\frac{dV}{dt} \geq q(\mathbf{x}), \quad (\text{П.4})$$

где $q(\mathbf{x})$ — некоторая определенно положительная функция ($q(0) = 0$, $q(\mathbf{x}) > 0$ при $\mathbf{x} \neq 0$). В качестве функции $q(\mathbf{x})$ можно принять определенно положительную фун-



кцию $q(\mathbf{x}) = (1 - \alpha)|\mathbf{x}|^2$. Это следует из того, что в каждой точке некоторой достаточно малой окрестности $\varepsilon_1 \subset \varepsilon$ точки $\mathbf{x} = 0$ модуль

$$\left| \sum_{i=1}^n \frac{\partial V}{\partial x_i} \frac{1}{|\mathbf{x}|} \frac{\varphi_i(\mathbf{x}, t)}{|\mathbf{x}|} \right| \quad (\text{П.5})$$

второго слагаемого в квадратной скобке соотношения (П.3) меньше первого слагаемого $\alpha > 0$ (тогда сумма обоих слагаемых в каждой из указанных точек окрестности ε_1 положительна и, следовательно, как видно из соотношения (П.3), при $q(\mathbf{x}) = (1 - \alpha)|\mathbf{x}|^2$ выполняется соотношение (П.4)). Действительно, так как функция $V(\mathbf{x})$ является определенно отрицательной квадратичной формой, то каждая из производных $\partial V / \partial x_i$, $i = 1, \dots, n$, является линейной однородной функцией и поэтому модуль значения каждого из выражений $(\partial V / \partial x_i)(1/|\mathbf{x}|)$, $i = 1, \dots, n$ ограничен в любой окрестности точки $\mathbf{x} = 0$ одним и тем же числом. Но в силу условий (3) окрестность ε_1 точки $\mathbf{x} = 0$ можно выбрать так, чтобы значения функций $\varphi_i(\mathbf{x}, t)/|\mathbf{x}|$, $i = 1, \dots, n$ были в точках этой окрестности столь малы, что при этом модуль (П.5) второго слагаемого в квадратной скобке соотношения (П.3) становится в этих точках меньше первого слагаемого $\alpha > 0$.

Малость модуля (П.5) по сравнению с числом $\alpha > 0$ можно также доказать, применяя следующую цепочку неравенств, в которых используются, в частности, ограничительные условия (2):

$$\begin{aligned} \left| \sum_{i=1}^n \frac{\partial V}{\partial x_i} \frac{1}{|\mathbf{x}|} \frac{\varphi_i(\mathbf{x}, t)}{|\mathbf{x}|} \right| &\leq \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial V}{\partial x_i} \right| \frac{1}{|\mathbf{x}|} \frac{|\varphi_i(\mathbf{x}, t)|}{|\mathbf{x}|} \leq \\ &\leq \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial V}{\partial x_i} \right| \frac{1}{|\mathbf{x}|} \frac{w(\mathbf{x})}{|\mathbf{x}|}. \end{aligned}$$

Так как, согласно соотношению, (6) $\lim_{\mathbf{x} \rightarrow \infty} (w(\mathbf{x})/|\mathbf{x}|) = 0$, то окрестность $\varepsilon_1 \subset \varepsilon$ можно выбрать такой, чтобы правая часть

$$\sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial V}{\partial x_i} \right| \frac{1}{|\mathbf{x}|} \frac{w(\mathbf{x})}{|\mathbf{x}|}$$

цепочки неравенств была в каждой точке окрестности ε_1 меньше числа α . Но тогда, очевидно,

$$\left| \sum_{i=1}^n \frac{\partial V}{\partial x_i} \frac{1}{|\mathbf{x}|} \frac{w(\mathbf{x})}{|\mathbf{x}|} \right| < \alpha.$$

Итак, сказанное позволяет утверждать, что в некоторой окрестности точки $\mathbf{x} = 0$ при $q(\mathbf{x}) = (1 - \alpha)|\mathbf{x}|^2$ выполнено соотношение (П.4) и, следовательно, производная dV/dt является в этой окрестности при любых функциях $\varphi_i(\mathbf{x}, t)$, удовлетворяющих условиям (2), определенно положительной. А так как к тому же функция $V(\mathbf{x})$ является определенно отрицательной и имеет бесконечно малый высший предел (ибо не зависит от t), то согласно теореме второго метода Ляпунова об асимптотической устойчивости, точка равновесия $\mathbf{x} = 0$ не-

линейной системы (1) будет асимптотически устойчивой при любых функциях $\varphi_i(\mathbf{x}, t)$, удовлетворяющих условиям (2).

Пусть теперь вещественная часть некоторых корней характеристического полинома матрицы $\mathbf{A}$ положительна. Покажем, что это является достаточным условием неустойчивости точки равновесия $\mathbf{x} = 0$ нелинейной системы (1) при любых функциях $\varphi_i(\mathbf{x}, t)$, удовлетворяющих условиям (2). В случае наличия указанных корней для уравнения в частных производных

$$\sum_{i=1}^n (a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n) \frac{\partial V}{\partial x_i} = |\mathbf{x}|^2 + \lambda V,$$

как известно [12, 13], найдутся квадратичная форма $V(\mathbf{x})$ и положительное число λ , которые удовлетворяют этому уравнению, причем форма $V(\mathbf{x})$ в сколь угодно малой окрестности точки $\mathbf{x} = 0$ имеет положительные значения. Взяв производную от этой формы по времени в силу нелинейной системы (1), получим

$$\frac{dV}{dt} = \lambda V + W(\mathbf{x}, t), \quad (\text{П.6})$$

где

$$W(\mathbf{x}, t) = |\mathbf{x}|^2 + \sum_{i=1}^n \frac{\partial V}{\partial x_i} \varphi_i(\mathbf{x}, t) = |\mathbf{x}|^2 \left[1 + \sum_{i=1}^n \frac{\partial V}{\partial x_i} \frac{1}{|\mathbf{x}|} \frac{\varphi_i(\mathbf{x}, t)}{|\mathbf{x}|} \right].$$

Функция $W(\mathbf{x}, t)$ совпадает с правой частью соотношения (П.2) и соответственно может быть представлена так же, как правая часть соотношения (П.3), которая как функция аргументов $\mathbf{x}, t$ является, как показано выше, определенно положительной функцией при любых функциях $\varphi_i(\mathbf{x}, t)$, удовлетворяющих условиям (2). Но тогда форма $V(\mathbf{x})$, производная которой в силу системы (1) приводится к виду (П.6), будет удовлетворять условиям второй теоремы о неустойчивости прямого метода Ляпунова [12]. Поэтому точка равновесия $\mathbf{x} = 0$ нелинейной системы (1) будет неустойчивой при любых функциях, удовлетворяющих условиям (2).

Таким образом, достаточным условием того, что при любых функциях $\varphi_i(\mathbf{x}, t)$, удовлетворяющих условиям (2), характер устойчивости нелинейной системы (1) совпадает с характером устойчивости линейной системы (10), является то, что либо все корни характеристического полинома матрицы $\mathbf{A}$ расположены левее мнимой оси, либо некоторые из них располагаются правее этой оси. Лемма доказана.

Доказательство теоремы. Надо доказать, что при условии теоремы, налагаемом на расположение корней характеристического многочлена матрицы $\mathbf{A}$, характер устойчивости точки равновесия $\mathbf{x} = 0$ систем (1) и (7) одинаков при любых рассматриваемых (см. определение) возмущениях $\mathbf{A}'\mathbf{x}, \varphi^1(\mathbf{x}, t)$.

По условию теоремы либо все указанные корни лежат левее мнимой оси (тогда линейная система (10) асимптотически устойчива), либо среди этих корней имеются корни, лежащие правее этой оси (точка 0 системы (10) неустойчива). При изменении элементов матрицы $\mathbf{A}$ соответствующие ей корни изменяются не-

прерывно [14]. Поэтому если корни, соответствующие матрице A , все лежат левее мнимой оси, то при достаточно малых элементах матрицы A' корни, соответствующие матрице $A + A'$, также все будут лежать левее мнимой оси. Следовательно, точка равновесия $x = 0$ линейных систем (10) и

$$\dot{x} = (A + A')x, \quad x \in R^n, \quad (П.7)$$

будут асимптотически устойчивыми. Но тогда, согласно лемме, асимптотически устойчивыми будут точки равновесия $x = 0$ нелинейных систем (1) и (7), так как соответствующие этим системам нелинейные функции $\varphi(x, t)$ и $\psi(x, t) = \varphi(x, t) + \varphi^1(x, t)$ не изменяют характер устойчивости точки равновесия $x = 0$. Заметим, что компоненты $\psi_i(x, t) = \varphi_i(x, t) + \varphi_i^1(x, t)$, $i = 1, \dots, n$, функции $\psi(x, t)$ удовлетворяют требуемому условию типа условия (2)

$$|\psi_i(x, t)| \leq w_{\Sigma}(x), \quad i = 1, \dots, n, \quad t \geq 0, \quad x \in \varepsilon. \quad (П.8)$$

Действительно, $|\psi_i(x, t)| = |\varphi_i(x, t) + \varphi_i^1(x, t)| \leq |\varphi_i(x, t)| + |\varphi_i^1(x, t)|$, но так как согласно условиям (2) и (8) имеем $|\varphi_i(x, t)| \leq w(x)$ и $|\varphi_i^1(x, t)| \leq w_B(x)$, $t \geq 0$, $x \in \varepsilon$, то $|\psi_i(x, t)| \leq |\varphi_i(x, t)| + |\varphi_i^1(x, t)| \leq w(x) + w_B(x) = w_{\Sigma}(x)$, где $w_{\Sigma}(x)$ — скалярная непрерывно дифференцируемая определенно положительная функция, ибо согласно условиям (2) и (8) скалярные функции $w(x)$, $w_B(x)$ непрерывно дифференцируемы и определенно положительны. Из условия (П.8), очевидно, следует, что функции $\psi_i(x, t)$ удовлетворяют условию

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{|\psi_i(x, t)|}{|x|} = 0,$$

аналогичному условию (3).

Если же среди корней, соответствующих матрице A , имеются корни, лежащие правее мнимой оси, то при достаточно малых элементах матрицы A' число правых корней, соответствующих матрице $A + A'$, останется прежним в силу непрерывной зависимости корней от элементов матрицы. Поэтому точки равновесия $x = 0$ линейных систем (10) и (П.7) будут неустойчивыми.

Но тогда на основании леммы будут неустойчивыми точки равновесия $x = 0$ нелинейных систем (1) и (7), ибо нелинейные функции $\varphi(x, t)$ и $\psi(x, t) = \varphi(x, t) + \varphi^1(x, t)$ не могут изменить характер устойчивости точки равновесия $x = 0$.

Таким образом, при условиях теоремы характер устойчивости нелинейных систем (1) и (7) при рассматриваемых возмущениях $A'x$, $\varphi^1(x, t)$ остается одинаковым. Теорема доказана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андронов А.А., Понтрягин Л.С. Грубые системы // Доклады АН СССР. — 1937. — Т. — 14, № 5. — С. 247.
2. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. — М.: Физматгиз, 1959. — С. 427.
3. Андронов А. А. Собрание трудов Андропова А.А. — М.: Изд. АН СССР. — 1956. — С. 183.
4. Арнольд И.В. Дополнительные главы теории обыкновенных дифференциальных уравнений. — М.: Наука, 1978. — С. 84.
5. Красовский Н.Н. Некоторые задачи теории устойчивости движения. — М.: Физматгиз, 1959.
6. Математическая энциклопедия. — М.: Сов. Энциклопедия, 1984. — Т. 3. — С. 422.
7. Математическая энциклопедия. — Там же, 1977. — Т. 1. — С. 1134.
8. Арнольд И.В. Обыкновенные дифференциальные уравнения. — М.: Наука, 1971. — С. 129.
9. Жуков В.П. О достаточных и необходимых условиях грубости нелинейных динамических систем в смысле сохранения характера устойчивости // Автоматика и телемеханика. — 2008. — № 1. — С. 30—38.
10. Фихтенгольц Г.М. Основы математического анализа. — М.: Наука, 1968. — Т. 1.
11. Шилов Г.Е. Математический анализ (функции нескольких вещественных переменных). — М.: Наука, 1972.
12. Ляпунов А.Н. Общая задача об устойчивости движения. — М.; Л.: ОНТИ, 1935.
13. Малкин И.Г. Теория устойчивости движения. — М.: Наука, 1966.
14. Ланкастер П. Теория матриц. — М.: Наука, 1978. — С. 208.

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

Жуков Виктор Павлович — д-р техн. наук, зав. лабораторией, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ☎(495) 334-89-61, ✉vpzhukov@ipu.ru.

Новая книга

Митришкин Ю.В. Линейные модели управляемых динамических систем: учеб. пособие: в 2 ч. — Ч. 1. Уравнения «вход — выход» и «вход — состояние — выход». — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. — 222 с.: ил.

Рассмотрены линейные модели управляемых динамических систем в непрерывном времени с сосредоточенными параметрами, представляемые в переменных «вход — выход» и в пространстве состояний: «вход — состояние — выход». Приведены сведения, необходимые для понимания математического описания линейных моделей систем, из разделов функционального анализа и обыкновенных дифференциальных уравнений. Рассмотрены линейные скалярные SISO-модели (Single-Input-Single-Output: один вход — один выход) и многомерные MIMO-модели (Multi-Inputs-Multi-Outputs: много входов — много выходов). Представлены простейшие численные примеры, иллюстрирующие линейные модели динамических систем. Приведена программа на языке MATLAB для получения временных и частотных характеристик динамических систем. Представлены результаты исследования с ее помощью моделей некоторых элементарных динамических звеньев.



ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕЧЕТКИХ СИСТЕМ: МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ¹

И.А. Ходашинский

Рассмотрены основные этапы построения нечетких моделей: экспертное оценивание, идентификация структуры, идентификация параметров. Отмечено, что экспертное оценивание включает в себя определение типа нечеткой модели, выбор t -нормальных функций для задания нечетких логических операций, выбор способов нечеткого вывода. Для идентификации структуры предложено применять два метода: нечеткий кластерный анализ и алгоритм перебора. Для идентификации параметров выбраны следующие алгоритмы: генетический, муравьиной колонии, роящихся частиц, имитации отжига. Приведены результаты имитационного эксперимента.

Ключевые слова: идентификация нечетких моделей, метаэвристики, имитация отжига, генетический алгоритм, алгоритм муравьиной колонии, алгоритм роящихся частиц.

ВВЕДЕНИЕ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Идентификация систем, в том числе и нечетких, играет принципиальную роль в теории управления. Нечеткая система может быть построена либо на основе знаний эксперта, либо на основе наблюдаемых данных, либо на совместном использовании знаний и данных. Идентификация рассматривается в настоящей работе как процесс построения модели, связанный с установлением закономерностей между входными и выходными переменными объекта.

Нечеткая модель определена как система с n входными переменными $\mathbf{X} = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, определенными на входной области рассуждений $DX = DX_1 \times DX_2 \times \dots \times DX_n$, и одной выходной переменной Y , определенный на выходной области рассуждений DY . Четкое значение, которое принимает входная переменная X_j , обозначается как x_j и как u для выходной переменной Y [1, 2].

Нечеткая область определения i -й входной переменной X_i обозначена как $FX_i = \{LX_{i,1}, \dots, LX_{i,p_i}\}$, где p_i — число лингвистических термов (нечетких значений), на которых определена входная переменная, $LX_{i,k}$ задает функцию принадлежности и имя k -го лингвистического терма. Аналогично, $FY = \{LY_1, \dots, LY_q\}$ — нечеткая область определе-

ния выходной переменной, q — число нечетких значений, LY_j — функция принадлежности и имя выходного лингвистического терма.

База правил в нечеткой системе типа Мамдани представляет собой множество нечетких правил вида

$$R_j: LX_{1,j_1} \text{ AND } \dots \text{ AND } LX_{n,j_n} \rightarrow LY_j. \quad (1)$$

Нечеткое j -е правило в системе типа синглтон имеет вид

$$R_j: LX_{1,j_1} \text{ AND } \dots \text{ AND } LX_{n,j_n} \rightarrow r_j, \quad (2)$$

где r_j — действительное число, которым оценивается выход u .

Нечеткое j -е правило в модели типа Такаги—Сугено имеет вид

$$R_j: LX_{1,j_1} \text{ AND } \dots \text{ AND } LX_{n,j_n} \rightarrow \\ \rightarrow r_{0j} + r_{1j}x_1 + r_{2j}x_2 + \dots + r_{nj}x_n,$$

здесь выход u оценивается линейной функцией.

Таким образом, нечеткая система осуществляет отображение $F: \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$. Важную роль в этом отображении играют функции принадлежности $\mu_{LX_{ij}}(x_i)$, указывающие степень принадлежности четкой переменной x_i нечеткому понятию LX_{ij} . Каждая функция принадлежности задается своим набором параметров, например, треугольная — тройкой параметров, трапецевидная — четверкой, гауссова и параболическая — двойкой.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 06-08-00248).

Обучение системы ведется на основе таблиц наблюдений или тестовых функций $f(\mathbf{x})$. Необходимо так построить базу правил, чтобы ошибка вывода, определяемая как

$$\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |f(\mathbf{x}_i) - F(\mathbf{x}_i)|, \text{ или } \frac{1}{M} \sqrt{\sum_{i=1}^M (f(\mathbf{x}_i) - F(\mathbf{x}_i))^2},$$

$$\text{или } \max_{i \in M} |f(\mathbf{x}_i) - F(\mathbf{x}_i)|, \quad (3)$$

была минимальной, где M — число наблюдений.

В общем случае построение нечеткой системы состоит из следующих основных этапов [3]:

— *экспертное оценивание* — задание типа нечеткой системы и сопутствующих ему параметров;

— *идентификация структуры* — выбор переменных ($\mathbf{X}$, $D\mathbf{X}$, $\mathbf{Y}$, $D\mathbf{Y}$, p_i , q) и нечетких правил R_j ;

— *идентификация параметров* — поиск оптимальных значений всех параметров, задействованных в нечеткой системе, т. е. нахождение значений консеквента (ТО-части правила) и параметров функций принадлежности в антецеденте (ЕСЛИ-части) каждого правила ($F\mathbf{X}_p$, $F\mathbf{Y}$) на основе заданных критериев качества и метода оптимизации выбранного критерия;

— *проверка правильности модели*.

Цель работы состоит в описании и сравнении методов, алгоритмов и эвристик реализации перечисленных этапов построения нечетких систем.

1. ЭКСПЕРТНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ

Идентификация нечетких систем базируется на данных наблюдений, однако пока не представляется возможным исключить в этом процессе участие эксперта, который решает следующие задачи: определение типа нечеткой системы (синглтон, Мамдани или Такаги—Сугено); выбор t -нормальных функций для задания нечетких логических операций; выбор способов нечеткого вывода (для системы типа Мамдани: аппроксимация Мамдани либо формальнологический вывод). В связи с изложенным, в процесс построения нечеткой системы нами включен рассматриваемый этап.

Выбор типа системы определяется решаемой задачей. Если решается задача интерполяции или аппроксимации, причем точность является определяющим фактором, то выбор должен быть сделан в пользу нечеткой системы типа Такаги—Сугено.

Если решается задача извлечения знаний из данных (в виде лингвистических правил) или поиск ассоциативных связей во множестве данных, то для этих целей необходимо использовать нечеткую систему типа Мамдани. Несомненное достоинство таких моделей заключается в их понятности и интерпретируемости. Недостаток — в высо-

ких вычислительных затратах ведения нечеткого вывода.

Система типа синглтон может быть использована как для решения задач аппроксимации, так и извлечения знаний.

Нечеткая модель типа синглтон, задаваемая правилами (2), осуществляет отображение $F: \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}$, заменяя оператор нечеткой конъюнкции произведением, а оператор агрегации нечетких правил — сложением. Отображение F определяется следующей формулой:

$$F(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_{LX1i}(x_1) \mu_{LX2i}(x_2) \dots \mu_{LXni}(x_n) r_i}{\sum_{i=1}^m \mu_{LX1i}(x_1) \mu_{LX2i}(x_2) \dots \mu_{LXni}(x_n)},$$

где $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_n]^T \in \mathfrak{R}^n$, m — число правил нечеткой модели, n — число входных переменных в модели, μ_{LXij} — функции принадлежности.

Отображение F для модели типа Такаги—Сугено определяется формулой:

$$F(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_{LX1i}(x_1) \mu_{LX2i}(x_2) \dots \mu_{LXni}(x_n) (r_{0i} + r_{1i}x_1 + r_{2i}x_2 + \dots + r_{ni}x_n)}{\sum_{i=1}^m \mu_{LX1i}(x_1) \mu_{LX2i}(x_2) \dots \mu_{LXni}(x_n)}.$$

Для описания отображения входного вектора $\mathbf{X}$ в выходное значение y в нечетких системах типа Мамдани применяются методы нечеткой логики, например, аппроксимация Мамдани или метод, основанный на формальном логическом доказательстве [4, 5], при этом эксперт должен задать тип оператора импликации.

2. ИДЕНТИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ

Идентификация структуры — определение структурных характеристик нечеткой системы, таких как число нечетких правил, число лингвистических термов, на которое разбиты входные переменные. Такая идентификация выполняется с помощью нечеткого кластерного анализа либо метода перебора.

Применение алгоритмов *кластерного анализа* направлено на разделение общей генеральной совокупности на кластеры так, чтобы в каждом из них находились наиболее близкие по свойствам объекты. Нечеткая кластеризация является одним из наиболее интересных методов выявления возможных групп и проверки гипотез о структуре данных. Методы нечеткой кластеризации позволяют одному и тому же объекту принадлежать одновременно нескольким кластерам, но с различной степенью принадлежности. Обычно каждый кластер



характеризуется некоторым прообразом (прототипом), который описывается центром кластера и некоторой дополнительной информацией, например, размером и формой кластера. Существует множество методик кластеризации. В данной работе рассмотрен алгоритм нечетких c -средних [6].

Исходной информацией для кластеризации служит таблица наблюдений $\mathbf{T} = \{\mathbf{t}_1, \mathbf{t}_2, \dots, \mathbf{t}_M\}$, где k -й элемент $\mathbf{t}_k = (x_k, y_k)$, $\mathbf{x}_k = [x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kn}]$ — вектор входных значений, y_k — выходное значение, M — число наблюдений, n — число входных переменных, $\mathbf{x}_k \in DX$, $y_k \in DY$. Пусть $P(\mathbf{T})$ — мощность множества $\mathbf{T}$, т. е. множество всех подмножеств множества $\mathbf{T}$. Нечеткое c -разбиение $\mathbf{T}$ есть множество $\{A_i | A_i \in P(\mathbf{T}), 1 \leq i \leq c, 2 \leq c \leq M - 1\}$, c — число кластеров. Кластеры характеризуются матрицей нечеткого разбиения $\mathbf{F} = [\mu_{ki}]$, которая обладает следующими свойствами:

$$\forall_k = \overline{1, M} \left(\sum_{i=1}^c \mu_{ki} = 1 \right), \quad \forall_i = \overline{1, c} \left(0 < \sum_{k=1}^M \mu_{ki} < M \right). \quad (4)$$

Алгоритм нечетких c -средних основан на минимизации расстояния от наблюдаемых данных до центров кластеров. Евклидово расстояние вычисляется по формуле [6]:

$$\sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^M (\mu_{ki})^m \|\mathbf{v}_i - \mathbf{t}_k\|^2,$$

где $\mathbf{v}_i = \frac{\sum_{k=1}^M (\mu_{ki})^m \mathbf{t}_k}{\sum_{k=1}^M (\mu_{ki})^m}$ — вектор центров нечетких кластеров, $m \in [1, \infty)$ — эмпирическое число, обычно равное двум.

Собственно алгоритм нечетких c -средних состоит в следующем [6].

Вход. Таблица наблюдений $\mathbf{T}$, число кластеров c , число m , параметр останова ε .

Выход. Матрица нечеткого разбиения $\mathbf{F}$ и матрица центров кластеров $\mathbf{V}$.

Шаг 1. Случайным образом инициализировать матрицу нечеткого разбиения $\mathbf{F}$, удовлетворяющую условиям (4).

Шаг 2. Вычислить вектор центров кластеров $\mathbf{v}_i$.

Шаг 3. Рассчитать расстояние d_{ki} между k -м наблюдением из матрицы $\mathbf{T}$ и i -м центром кластера $d_{ki} = \sqrt{\mathbf{t}_k - \mathbf{v}_i}$.

Шаг 4. Рассчитать очередное приближение матрицы $\mathbf{F}$;

$$\text{если } d_{ki} > 0, \text{ то } \mu_{ki} = \left(d_{ki}^2 \sum_{j=1}^c \frac{1}{d_{kj}^2} \right)^{\frac{-1}{(m-1)}},$$

$$\text{если } d_{ki} = 0, \text{ то } \mu_{ki} = \begin{cases} 1, & j \neq i, \\ 0, & j = i, \end{cases} \quad j = \overline{1, c}.$$

Шаг 5. Если $\|\mathbf{F} - \mathbf{F}^*\|^2 < \varepsilon$, то выход из алгоритма, иначе переход на шаг 2. Здесь $\mathbf{F}^*$ — матрица нечеткого разбиения, полученная на предыдущей итерации алгоритма.

В результате работы алгоритма вычисляется матрица центров кластеров $\mathbf{V} = \{\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_c\}$, где каждое $\mathbf{v}_k = \{v_{k1}, v_{k2}, \dots, v_{kn}, v_{kn+1}\}$, v_{ki} — значение координаты i -й переменной в k -м кластере, v_{kn+1} — значение координаты выходной переменной в k -м кластере. Каждый выделенный кластер соответствует одному лингвистическому правилу базы правил нечеткой системы.

Каждый лингвистический терм, находящийся в antecedенте нечетких правил, задается своей функцией принадлежности. В качестве функции принадлежности выбрана функция гауссова типа, которая описывается формулой:

$$\mu(x) = \exp\left(-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}\right).$$

Опираясь на результаты кластерного анализа, можно определить параметры функции принадлежности следующим образом:

$$a = v_{ij},$$

$$\sigma_{ij}^2 = \frac{\sum_{k=1}^M (\mu_{ki})^m (x_{kj} - v_{ij})^2}{\sum_{k=1}^M (\mu_{ki})^m}.$$

Далее, после определения необходимых параметров и построения функций принадлежности, идет формирование правил нечеткой базы. Нечеткое понятие $LX_{i,k}$ в правилах (1) и (2) соответствует суждению « X_i приблизительно равно v_{ij} ». Общий вид правила в модели типа синглтон будет иметь следующий вид:

$$R_j: X_1 \approx v_{j1} \text{ AND } \dots \text{ AND } X_n \approx v_{jn} \rightarrow v_{jn+1},$$

а в модели типа Мамдани —

$$R_j: X_1 \approx v_{j1} \text{ AND } \dots \text{ AND } X_n \approx v_{jn} \rightarrow y \approx v_{jn+1},$$

где v_{ji} — значение координаты i -й входной переменной в j -м кластере, v_{jn+1} — значение координаты выходной переменной в j -м кластере, $1 \leq j \leq c$. Таким образом, решена задача определения лингвистических термов и формирования базы нечетких правил.

Использование гауссовых функций принадлежности в нечетких правилах не единственно возможное. Методы и алгоритмы перехода от гауссовых функций к треугольным, трапециевидным и параболическим описаны в работе [7].

Кластерный анализ — это в конечном итоге метод выбора небольшого числа нечетких «репрезентативных» правил, описывающих пространство входных и выходных данных. Достоинство данного метода состоит в алгоритмическом разбиении входного пространства на фиксированное число кластеров, а значит, и на фиксированное число термов и правил. К недостаткам можно отнести отсутствие гарантии, что входное пространство должным образом представлено посредством центров кластеров. Кроме того, ряд авторов отмечают чувствительность алгоритма к шумам и выбросам в данных [8, 9].

Алгоритм перебора находит число термов, на которое необходимо разбить область определения входных переменных. Сначала генерируется один терм, охватывающий всю область определения входных переменных, определяется ошибка аппроксимации. Если ошибка превышает заранее заданную, то начинается последовательное разбиение области определения на большее число термов, пока не будет найдено такое число термов, при котором заданная ошибка будет достигнута.

Вход: число входных переменных, таблица наблюдений, заданная ошибка.

Выход: база правил.

Шаг 1. Задать начальное число термов для каждой переменной равным 1.

Шаг 2. Сформировать базу правил, при заданном числе термов.

Шаг 3. Найти выходное значение нечеткой системы.

Шаг 4. Найти ошибку вычислений.

Шаг 5. Если ошибка больше заданной, то увеличить число термов каждой переменной на 1 и перейти на шаг 2, иначе *Выход*.

У алгоритма перебора есть важное достоинство: функции принадлежности покрывают всю область определения входных переменных. Недостаток такой схемы — экспоненциальный рост числа правил с ростом числа входных переменных и лингвистических термов. Нечеткие системы с большим числом правил имеют более высокую точность, но более слабую вычислительную эффективность и интерпретируемость.

3. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ НЕЧЕТКИХ МОДЕЛЕЙ

Начиная с ранних работ [1, 2], проблема идентификации параметров нечетких моделей решается методами оптимизации нелинейных функций. На этапе идентификации параметров происходит настройка параметров антецедентов и консеквентов нечетких правил путем оптимизации работы нечеткой системы по заданному критерию.

Трудности применения классических методов оптимизации нелинейных функций, такие как проблема локального экстремума и «проклятие

размерности», заставили специалистов обратиться к таким метаэвристическим подходам, как алгоритмы имитации отжига, генетические алгоритмы, алгоритмы муравьиной колонии.

Алгоритм имитации отжига основан на аналогии с процессом кристаллизации с минимальной энергией при охлаждении [10], в нем используется упорядоченный случайный поиск. Особенность алгоритма — допустимость принятия решений, приводящих к увеличению ошибки.

На начальном этапе работы алгоритма создается текущее решение, которое, при его изменении случайным образом, переходит в рабочее. Рабочее решение может опять вернуться в текущее либо перейти в лучшее при условии уменьшения энергии δE . Но рабочее решение может быть принято в качестве текущего, даже если его энергия превышает энергию текущего, в том случае, когда выполняется критерий допуска.

Критерий допуска основывается на следующем уравнении:

$$P(\delta E) = \exp(-\delta E/T).$$

При высокой температуре T плохие решения принимаются чаще, чем отбрасываются. При снижении температуры вероятность принятия худшего решения уменьшается. Таким образом, при высоких температурах алгоритм отжига выполняет поиск оптимального решения во всем диапазоне решений. При понижении температуры диапазон поиска уменьшается. Существует множество вариантов снижения температуры. В данной работе используется функция $T_{i+1} = \alpha T_i$, где α — коэффициент снижения температуры, $0 < \alpha < 1$.

Собственно алгоритм имитации отжига для параметрической идентификации нечетких систем состоит в следующем.

Вход: начальная температура, конечная температура, число итераций при одном значении температуры, функция изменения температуры.

Выход: оптимальные параметры функций принадлежности нечеткой системы.

Шаг 1. Генерируются значения параметров функций принадлежности нечеткой системы. Эти значения записываются в текущее решение и в лучшее решение.

Шаг 2. Значения параметров передаются нечеткой системе, которая на их основе находит значение выходной переменной. Это значение сравнивается с эталонным и вычисляется ошибка (ошибка текущего решения).

Шаг 3. Текущее решение копируется в рабочее, и рабочее решение изменяется случайным образом.

Шаг 4. Из рабочего решения значения параметров передаются нечеткой системе, которая на их основе находит значение выходной переменной. Это значение сравнивается с эталонным и вычисляется ошибка (ошибка рабочего решения).

Шаг 5. Сравниваются ошибки текущего и рабочего решения. Если ошибка рабочего решения меньше, чем



ошибка текущего решения, то переход к шагу 6. В противном случае, определяется критерий допуска. Если критерий допуска выполняется, то переход к шагу 6. В противном случае текущее решение копируется в рабочее, и осуществляется переход к шагу 7.

Шаг 6. Рабочее решение копируется в текущее, и ошибка текущего решения сравнивается с ошибкой лучшего решения. Если ошибка текущего решения меньше, то текущее решение копируется в лучшее решение.

Шаг 7. Уменьшается температура. Если температура становится равной заранее заданному конечному значению, т. е. выполняется условие окончания, то переход к шагу 8. В противном случае переход к шагу 4.

Шаг 8. Процесс поиска прекращается. Оптимальные параметры системы сохраняются как лучшее решение.

Достоинство алгоритма отжига заключается в успешном прохождении локальных минимумов и простоте реализации, недостаток — в больших временных затратах при не всегда высокой точности решений.

Решение задачи параметрической идентификации нечеткой системы возможно с помощью непрерывного либо дискретного *алгоритма муравьиной колонии* (НАМК и ДАМК, соответственно). Основу ДАМК составляет полный ориентированный граф с взвешенными дугами [11]. Веса дуг являются нормированными значениями параметров функций принадлежности [12]. Задача каждого муравья пройти столько дуг, сколько параметров необходимо оптимизировать. Например, для одной треугольной функции принадлежности — три параметра. Значение фермента на дугах определяет выбор муравьем очередной дуги. Значения весов пройденных муравьем дуг передаются в нечеткую систему, которая находит ошибку, и на пройденные дуги наносится количество фермента, обратно пропорциональное найденной ошибке. Нечеткая система описывается несколькими лингвистическими переменными. Каждая переменная описана несколькими функциями принадлежности. Муравьи в алгоритме делятся на колонии. Каждая колония муравьев отвечает за нахождение параметров своей функции.

Количество фермента, наносимого на дуги, пропорционально качеству решения, чем меньше ошибка вывода нечеткой системы, выполненного на выбранных параметрах, тем больше фермента наносится на дуги:

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} Q/L^k(t), & \text{если муравей проходит дугу } (i, j), \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

где Q — константа, определяющая количество фермента у отдельного муравья, $L^k(t)$ — значение ошибки на t -й итерации для параметров, выбранных k -м муравьем.

Вероятность выбора муравьем дуги (i, j) на t -й итерации, если дуга не является последним выбранным параметром функции принадлежности, вычисляется по формуле

$$p_{ij}(t) = \tau_{ij}(t)^\alpha / \sum_{l=1}^N \tau_{il}(t)^\alpha; \quad (5)$$

вероятность выбора k -м муравьем дуги (i, j) на t -й итерации, если дуга является последним выбранным параметром функции принадлежности, вычисляется по формуле

$$p_{ij}^k(t) = \frac{\tau_{ij}(t)^\alpha (1/L_j^k(t))^\beta}{\sum_{l=1}^N (\tau_{il}(t)^\alpha (1/L_l^k(t))^\beta)}, \quad (6)$$

где α — параметр, учитывающий важность (приоритет, значимость) фермента на пути; β — параметр, учитывающий важность (приоритет, значимость) ошибки; $\tau_{ij}(t)$ — интенсивность фермента

на дуге между узлами i и j на t -й итерации; $L_o^k(t)$ — значение ошибки на t -й итерации для параметров, выбранных k -м муравьем, если дуга (i, o) является последней, т. е. определяет третий параметр; N — множество узлов, смежных вершине i , причем узел j может быть выбран многократно; в отличие от классического применения алгоритма в нашем случае не формируется запрещенный список узлов; $l \neq i$.

Увеличение количества фермента определяется следующим образом:

$$\tau_{ij}(t+1) = \sum_{k=1}^M (\Delta\tau_{ij}^k(t) + \tau_{ij}(t)) \cdot \rho, \quad (7)$$

а его испарение — по формуле:

$$\tau_{ij}(t+1) = \tau_{ij}(t)(1 - \rho), \quad (8)$$

где $\rho \in [0; 1]$ — коэффициент снижения интенсивности фермента, M — число муравьев, прошедших по дуге (i, j) .

Далее приведен *алгоритм оптимизации трехпараметрической функции принадлежности*.

Шаг 1. Задать начальные параметры алгоритма и нечеткой системы.

Шаг 2. Задать популяции муравьев в колониях.

Шаг 3. Для всех муравьев текущей колонии определить три дуги, используя два раза формулу (5), затем формулу (6).

Шаг 4. Передать в нечеткую систему значения параметров функций принадлежности, определенных муравьями текущей колонии, и вычислить ошибки. Если параметры, переданные муравьем в нечеткую систему, лучше текущих, то сохранить новые значения параметров.

Шаг 5. Если имеется следующая колония, то сделать ее текущей и перейти на шаг 3, иначе перейти на шаг 6.

Шаг 6. Вычислить количество фермента на каждой дуге по формуле (7).

Шаг 7. Вычислить количество испаренного фермента по формуле (8).

Шаг 8. Если условие окончания работы алгоритма выполнено, то останов, иначе перейти к шагу 2.

Условием окончания работы алгоритма служит достижение заданного числа итераций либо получение ошибки, меньше заданной.

В ДАМК выбор очередной дуги ведется муравьем на основе дискретного распределения вероятности. В НАМК дискретное распределение заменяется на непрерывное с использованием функции плотности вероятности [13]. Наиболее часто применяется функция Гаусса. Ее преимущество в простом способе генерации случайных чисел, но очевидный недостаток в том, что она имеет только один максимум. Поэтому в НАМК используется функция плотности вероятности с гауссовым ядром, под которым понимается функция, основанная на взвешенной сумме нескольких одномерных гауссовых функций:

$$G^i(x) = \sum_{l=1}^k \omega_l \frac{1}{\sigma_l \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu_l)^2}{2\sigma_l^2}}.$$

Каждому идентифицируемому параметру соответствует свое гауссово ядро, $i = 1, \dots, n$, ω — вектор весов. В ДАМК информация о ферменте хранится в виде таблицы. В НАМК вводится понятие архива решений T . Архив решений представлен таблицей, в которой k строк. Каждая строка состоит из трех частей: найденное муравьем решение $s_l = \{s_l^1, s_l^2, \dots, s_l^n\}$, ошибка, вычисленная нечеткой системой, и вес решения ω_l . Решения в архиве расположены по возрастанию ошибки. Вес ω_l решения s_l вычисляется по формуле

$$\omega_l = \frac{1}{qk\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(l-1)^2}{2q^2k^2}},$$

где q — эмпирический параметр алгоритма.

Параметры гауссовой функции $g_l^i(x)$, определяются следующим образом:

$$\mu_l^i = s_l^i, \sigma_l^i = \xi \sum_{e=1}^k \frac{|s_e^i - s_l^i|}{k-1}.$$

Параметр $\xi > 0$ одинаков для всех размерностей и имеет эффект, подобный норме испарения фер-

мента в АМК. Чем выше значение ξ , тем ниже скорость сходимости алгоритма [13].

При добавлении нового решения в архив решений T худшее из них удаляется. Этот процесс аналогичен процессу испарения фермента в АМК.

Далее приведен собственно НАМК для параметрической идентификации нечетких систем.

Шаг 1. Задать начальные параметры.

Шаг 2. Сгенерировать популяцию муравьев в колониях.

Шаг 3. Сгенерировать несколько случайных решений для всех архивов решений с последующим оцениванием и ранжированием.

Шаг 4. Найти значения вектора весов. Сделать текущим первого муравья первой колонии.

Шаг 5. Для текущего муравья текущей колонии вычислить номер используемой функции Гаусса. Определить параметры функций Гаусса. Сгенерировать n случайных величин $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ на основе полученных функций.

Шаг 6. Найти ошибку вывода нечеткой системы при параметрах $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, если ошибка меньше текущей, то сохранить новые параметры.

Шаг 7. Добавить в архив новое решение, ранжировать архив, удалить из архива худшее решение.

Шаг 8. Если в текущей колонии имеется следующий муравей, то сделать его текущим и перейти на шаг 5, иначе перейти на шаг 9.

Шаг 9. Если имеется следующая колония, то сделать текущим первого муравья в этой колонии и перейти на шаг 5, иначе перейти на шаг 10.

Шаг 10. Если условие окончания работы алгоритма выполнено, то останов, иначе сделать текущим первого муравья первой колонии и перейти на шаг 5.

Условием окончания работы алгоритма служит достижение заданного числа итераций либо получение ошибки, меньше заданной.

Отметим, что для идентификации нечетких моделей дискретный и непрерывный алгоритмы муравьиной колонии нами применены впервые.

Работа генетического алгоритма (ГА) основана на принципах естественного отбора и наследования. Основное преимущество ГА перед другими методами оптимизации заключается в параллельной обработке множества альтернативных решений. При работе алгоритма большее внимание уделяется наиболее перспективным решениям, однако и худшие решения также участвуют в поиске.

В случае параметрической идентификации ген хромосомы кодирует один параметр нечеткой системы. Популяция — это множество хромосом, созданных на текущем шаге работы алгоритма. В качестве целевой функции выступает ошибка вывода нечеткой системы.

Схема генетического алгоритма сводится к следующей последовательности шагов.

Шаг 1. Генерируется популяция.

Шаг 2. Оценивается популяция. Если достигнуто условие окончания работы, то переход на шаг 4.



Шаг 3. Выбираются пары хромосом для скрещивания в соответствии с заданной стратегией и применяются генетические операторы скрещивания и мутации. Переход на шаг 2.

Шаг 4. Окончание работы. Вывод «наилучшего» решения.

В ГА для идентификации используются классические стратегии селекции хромосом (рулеточный отбор, турнирный отбор, элитаризм и случайный отбор), типы операторов скрещивания (одноточечный, многоточечный) и мутации (случайная одноточечная и многоточечная).

Алгоритм роящихся частиц (АРЧ) позволяет осуществлять поиск глобального оптимума в пространстве непрерывно меняющихся переменных [14]. Как и генетический алгоритм, это основанный на популяции метод поиска, в котором, вместо хромосомы — частица, вместо генов — координаты частицы в многомерном пространстве. Каждая частица представляет потенциальное решение, имеет память и хранит свою лучшую позицию в пространстве поиска. Известна частице и лучшая позиция роя. Зная эти две позиции, частица динамически изменяет скорость согласно ее собственному опыту и опыту полета других частиц. Таким образом, движение каждой частицы задается ее лучшей позицией и ее текущей скоростью, ускорением, заданным предыдущей позицией, и ускорением, заданным лучшей частицей в рое.

Пусть имеется n -мерное пространство поиска $S \subset \mathbb{R}^n$, рой состоит из N частиц. Позиция i -й частицы определяется вектором $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}) \in S$. Лучшая позиция, которую занимала i -я частица, определяется вектором $\mathbf{p}_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in}) \in S$. Скорость частицы определяется также n -местным вектором $\mathbf{v}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})$. Движение частиц определяют простые уравнения:

$$\mathbf{v}_i(k+1) = w\mathbf{v}_i(k) + c_1 \text{rand} \cdot (\mathbf{p}_i(k) - \mathbf{x}_i(k)) + c_2 \text{Rand} \cdot (\mathbf{p}_g(k) - \mathbf{x}_i(k)),$$

$$\mathbf{x}_i(k+1) = \mathbf{x}_i(k) + \mathbf{v}_i(k+1),$$

где $i = 1, 2, \dots, N$; $\mathbf{v}_i(k)$ — вектор скорости частицы i на итерации k ; $\mathbf{x}_i(k)$ — координаты частицы i на итерации k ; c_1 и c_2 — эмпирические константы ускорения из интервала; $\mathbf{p}_i(k)$ — лучшая позиция частицы i на первых k итерациях; $\mathbf{p}_g(k)$ — лучшая позиция частицы в рое (задается индексом g) на первых k итерациях; w — эмпирический коэффициент инерции из интервала; rand и Rand — случайные числа из интервала $[0, 1]$.

Обобщенный алгоритм метода состоит в следующем.

Шаг 1. Случайным образом генерируется рой.

Шаг 2. Оценка каждой частицы роя путем вычисления ошибки по формулам (3). Если достигнуто условие окончания работы (число итераций, значение ошибки), то переход на шаг 5.

Шаг 3. Определение для каждой частицы ее новых координат и вектора скорости.

Шаг 4. Расчет новых лучших позиций каждой частицы. Определение частицы с лучшей позицией в рое. Переход на шаг 2.

Шаг 5. Окончание работы.

По сравнению с генетическим алгоритмом алгоритм роящихся частиц прост в реализации и не требует больших вычислительных затрат, в нем отсутствуют операции скрещивания и мутации, частицы меняют позицию в пространстве поиска, не генерируя новых частиц.

4. ЭКСПЕРИМЕНТ

Две таблицы наблюдений были сформированы на основе следующих тестовых функций: 1) $f(x_1, x_2) = x_1 \sin(x_2)$, 2) $f(x_1, x_2) = \sin(2x_1/\pi) \sin(2x_2/\pi)$. Суть эксперимента заключалась в аппроксимации нечеткой системой заданных тестовых функций. Критерием аппроксимации служила ошибка вывода (3). Некоторые выводы по каждому из алгоритмов приведены ниже.

Алгоритм имитации отжига. Среднее значение ошибки не зависит от числа итераций для одного значения температуры, однако время работы системы заметно увеличивается при увеличении числа итераций. Средняя абсолютная ошибка (формула (3), первый функционал) уменьшается при увеличении коэффициента снижения температуры. При этом время работы меняется незначительно. Средняя абсолютная ошибка уменьшается при уменьшении начальной температуры от 1 до 10^{-4} , дальнейшее уменьшение начальной температуры приводит к увеличению средней абсолютной ошибки.

На основе проведенных экспериментов были получены следующие параметры алгоритма имитации отжига: начальная температура — 0,01, конечная температура — 0,00001, число итераций для одного значения температуры — 20, коэффициент снижения температуры — 0,8.

Алгоритм муравьиной колонии. В результате проведенных исследований было установлено, что увеличение числа итераций работы ДАМК, числа муравьев и значения параметра β уменьшают ошибку, увеличивая при этом время работы алгоритма. Такие параметры ДАМК, как α и Q и ρ не оказывают существенного влияния на время работы алгоритма и незначительно меняют ошибку вывода.

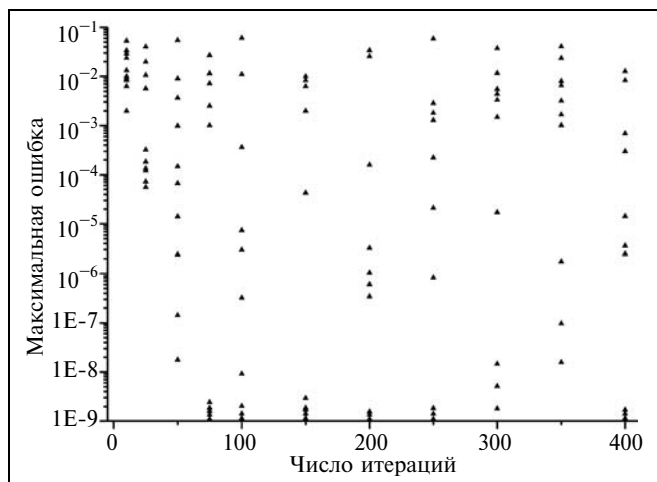


Рис. 1. Зависимость максимальной ошибки от числа итераций в непрерывном алгоритме муравьиной колонии

Непрерывный АМК имеет свойство застревать в локальных минимумах, по этой причине необходимо говорить о лучших и худших решениях при одних и тех же параметрах алгоритма. Разные решения получаются в силу случайности, присутствующей в самом алгоритме, однако не всегда этот случайный выбор способен вывести алгоритм из локального минимума. На рис. 1 (шкала логарифмическая) приведено распределение максимальной ошибки (формула (3), третий функционал) от числа итераций при аппроксимации первой тестовой функции (число муравьев — 24, размер архива — 16, число испытаний — 10, $q = 0,6$).

Эксперимент показывает, что худшее решение (большие ошибки) не зависит от числа итераций, лучшие решения (малые ошибки) появляются уже при числе итераций равном 75. Похожая зависимость наблюдается и при изменении числа муравьев. Время работы НАМК линейно зависит от числа итераций и от числа муравьев.

На рис. 2 (шкала логарифмическая) приведено распределение максимальной ошибки при изменении размера архива при аппроксимации первой тестовой функции. Здесь худшее решение не зависит от размера архива, наилучшие решения получены при размере архива 12...16. Размер архива не оказывает существенного влияния на время вывода.

Генетический алгоритм. Увеличение числа итераций алгоритма ведет к уменьшению значений ошибки, при этом линейно увеличивается и время работы алгоритма. Было установлено, что увеличение числа термов уменьшает значения ошибки, но ведет к возникновению следующих проблем: увеличивается время вывода, так как база правил растет экспоненциально; увеличивается размер хромосомы, и, следовательно, генетическому алго-

ритму требуется большее число шагов для настройки параметров функций принадлежности. Для указанных тестовых функций лучшие результаты показал способ формирования новой популяции по принципу, частичной замены, когда формируется «расширенная» популяция, в которую помещаются особи, как нового поколения, так и старого.

Алгоритм роящихся частиц. Большое влияние на сходимость и точность работы алгоритма имеют эмпирические константы ускорения и эмпирический коэффициент инерции. При небольших значениях коэффициента инерции ($w = 0,2...0,4$) имеется тенденция к застреванию в локальных минимумах, большие значения коэффициента инерции ($w = 1,4...1,6$) расширяют диапазон поиска на начальных стадиях и не способствуют точному определению минимума на заключительных стадиях. Эксперименты показали, что лучшие значения для

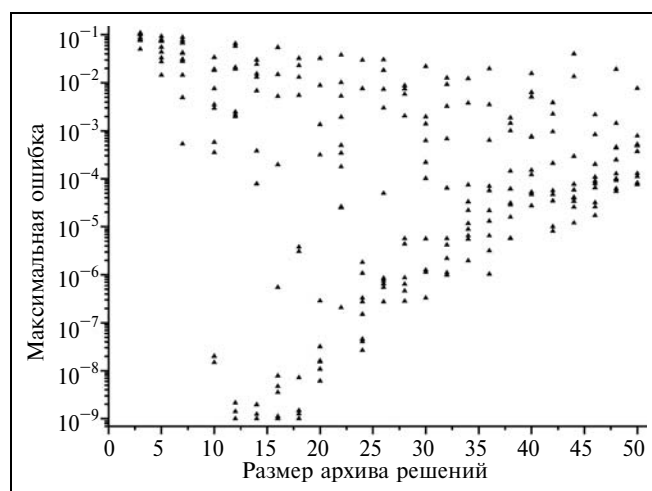


Рис. 2. Зависимость максимальной ошибки от размера архива в непрерывном алгоритме муравьиной колонии

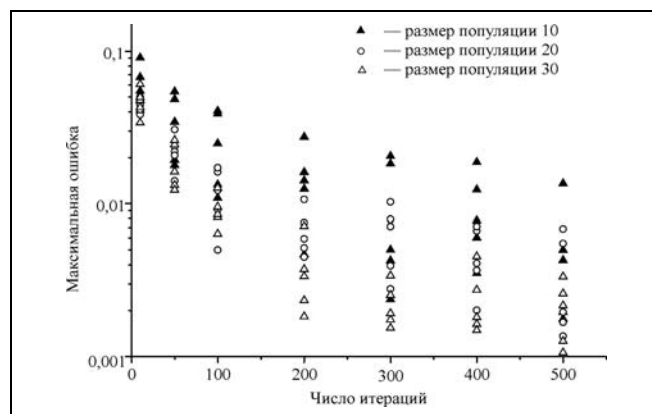


Рис. 3. Распределение максимальной ошибки решения при $w = 0,7$; $c_1 = 1,4$; $c_2 = 1,4$



Сравнение метаэвристик

Алгоритм	Параметры	Точность аппроксимации	Время поиска
Алгоритм отжига	Температура, закон охлаждения, критерий допуска	Очень низкая	Очень большое
Дискретный алгоритм муравьиной колонии	Фермент, число муравьев, эмпирические коэффициенты	Невысокая	Небольшое
Непрерывный алгоритм муравьиной колонии	Число муравьев, размер архива решений, эмпирические коэффициенты	Высокая	Небольшое
Генетический алгоритм	Размер популяции, селекция, мутация, скрещивание	Невысокая	Большое
Алгоритм роящихся частиц	Размер роя, коэффициент инерции, константы ускорения	Высокая	Большое

$w = 0,6...1,2$; константы ускорения должны быть определены в интервале $1,2...1,8$.

Распределение максимальной ошибки (формула (3), третий функционал) для пяти опытов в зависимости от числа итераций и размера популяции приведены на рис. 3 (шкала логарифмическая). Отметим, что здесь представлены не все проведенные нами опыты, а только наиболее типичные. Так, например, в одном из не представленных опытов максимальная ошибка аппроксимации на пятистах итерациях составила $4,092857719066 \cdot 10^{-10}$.

Качественный анализ рассмотренных алгоритмов приведен в таблице.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены методы идентификации нечетких систем, работающие последовательно и независимо. Дальнейшее развитие работы предполагает совместное использование различных метаэвристик для решения задачи идентификации нечетких моделей. С помощью таких метаэвристик на начальных этапах вычисляется начальное приближение, локализованное в области экстремума, на заключительном этапе уточняется положение экстремума градиентным методом или методом калмановской фильтрации.

Последовательная и независимая схема идентификации себя исчерпала, выбрать какой-либо один эффективный алгоритм решения проблемы

оптимизации не представляется возможным ввиду сложности и многоплановости самой проблемы, поэтому необходимо применять несколько алгоритмов и эвристик одновременно. При параллельном выполнении имеется возможность сотрудничества между эвристиками, а решение, произведенное одной процедурой, может быть впоследствии улучшено другой. Таким образом, сокращается время выполнения отдельных процедур, улучшается качество решения и повышается ошибкоустойчивость.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sugeno M., Yasukawa T. A fuzzy-logic-based approach to qualitative modeling // IEEE Trans. on Fuzzy Systems. — 1993. — Vol. 1. — P. 7—31.
2. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control // IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics. — 1985. — Vol. 15. — P. 116—132.
3. Ходашинский И.А. Технология идентификации нечетких моделей типа сингтон и Мамдани // Тр. VII междунар. конф. «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO'08 / Ин-т пробл. упр. — М., 2008. — С. 137—163.
4. Emami M.R., Turksen I.B., Goldenberg A.A. A unified parameterized formulation of reasoning in fuzzy modeling and control // Fuzzy Sets and Systems. — 1999. — Vol. 108. — P. 59—81.
5. Ходашинский И.А. Формальнологический метод и аппроксимация Мамдани в нечетком оценивании величин // Автометрия. — 2006. — № 1. — С. 55—67.
6. Espinosa J., Vandewalle J., Wertz V. Fuzzy logic, identification and predictive control. — London: Springer-Verlag, 2005. — 263 p.
7. Ходашинский И.А. Оценивание величин средствами нечеткой арифметики // Автометрия. — 2004. — № 3. — С. 21—31.
8. Chuang C.C., Su S.F., Chen S.S. Robust TSK fuzzy modeling for function approximation with outliers // IEEE Trans. on Fuzzy Systems. — 2001. — Vol. 9. — P. 810—821.
9. Menard M. Fuzzy clustering and switching regression models using ambiguity and distance rejects // Fuzzy Sets and Systems. — 2001. — Vol. 122. — P. 363—399.
10. Kirkpatrick S., Gelatt C.D., Vecchi M.P. Optimization by Simulated Annealing // Science. — 1983. — Vol. 220. — P. 671—680.
11. Dorigo M., Maniezzo V., Colomi A. Ant System: Optimization by Colony of Cooperating Agents // IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics. Part B. — 1996. — Vol. 26. — P. 29—41.
12. Ходашинский И.А., Дудин П.А. Оценивание параметров функций принадлежности на основе алгоритма муравьиной колонии / Тр. междунар. науч.-техн. конф. «Интеллектуальные системы» (IEEE AIS'07). — М.: Физматлит, 2007. — Т. 1. — С. 88—94.
13. Socha K., Dorigo M. Ant Colony Optimization for Continuous Domains / Technical Report TR/IRIDIA/2005-037, Universite Libre de Bruxelles. — Bruxelles, 2005. — 34 p.
14. Kennedy J., Eberhart R. Particle Swarm Optimization / Proc. of the 1995 IEEE Intern. Conf. on Neural Networks. — Perth: IEEE Service Center, 1995. — P. 1942—1948.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Ф.Ф. Пащенко.

Ходашинский Илья Александрович — д-р техн. наук, профессор, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, ☎(3822) 70-15-93, ✉hodashn@rambler.ru.

КОРПОРАТИВНАЯ МОДЕЛЬ СОГЛАСОВАНИЯ ИНТЕРЕСОВ С УЧЕТОМ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Т.В. Золотова

Представлена модель управления отраслевой корпорацией с ограничением по дефицитным и природным ресурсам, описывающая двухуровневую иерархическую систему управления. Рассмотрены её варианты: с дополнительным ограничением по допустимому уровню загрязнения природной среды, квотами и с системой штрафов за превышение допустимого уровня загрязнения.

Ключевые слова: корпорация, идеальная согласованность, максимизация прибыли, расчетные цены, тарифы на дефицитные и природные ресурсы, квоты, штраф.

ВВЕДЕНИЕ

Стремление к повышению эффективности деятельности технологически близких предприятий и организаций привело к возникновению необходимости их объединения. Одной из разновидностей таких объединений является корпорация — сложное организационное образование, состоящее из производственных и функциональных единиц, связанных в рамках единого процесса управления производством и капиталом. Вопросы организационного управления освещены, например, в работах [1–3].

Рассмотрим модель отраслевой корпорации, т. е. совокупность предприятий, взаимодействующих между собой для производства какого-либо конечного продукта или услуги (видов продукции или услуг может быть несколько) в рамках единого полного технологического цикла, и управляющую компанию, осуществляющую функции корпоративного управления предприятиями (см., например, работу [4]). Экономическим эффектом деятельности отраслевой корпорации будем считать совокупность производственных результатов, включающую в себя прибыль от реализации производственной продукции, а также охрану окружающей среды. Нанесение вреда окружающей среде сопряжено с дополнительными и возможно большими затратами корпорации на ее восстановление. Наличие последней составляющей экономического эффекта обусловлено еще и тем, что в настоящее время защита окружающей природной

среды представляет собой задачу государственного масштаба, требующую ее решения на каждом уровне управления [5].

Положительный эффект от интеграции — необходимое, но не достаточное условие успешности объединения. Объединение должно быть выгодным каждому предприятию, т. е. улучшать его положение. Это условие предъявляет требования к процессам планирования и управления в корпорации, которые должны включать в себя механизмы согласования интересов участников (внутренние расчетные цены, процедуры распределения прибыли и др.).

Корпоративное объединение предприятий представляет собой многоуровневую иерархическую систему, в центре которой управляющая компания, а её подсистемы — предприятия, находятся в подчинении у центра. В иерархической системе основным условием устойчивости (гарантированного выполнения необходимых глобальных ограничений на параметры системы) и эффективности функционирования (оптимизация гарантированного значения критерия эффективности центра) служит согласованность интересов всех элементов [6–8]. Если центр может достичь абсолютного максимума своего критерия эффективности, то интересы элементов системы идеально согласуемы.

Центр имеет возможность согласовывать выборы, воздействуя как на критерии элементов (собственно согласование интересов), так и на пространства управлений и информированность элементов о параметрах системы.



Такой подход к управлению корпорацией, прежде всего, позволяет диверсифицировать производство, снижая риски, связанные с изменяющимися условиями спроса на продукцию, а также обеспечить требуемый уровень качества окружающей природной среды, снижая риски неблагоприятных событий, вызванных воздействием негативных факторов производства. Методам управления риском в различных сферах деятельности посвящены, например, работы [9, 10].

1. МОДЕЛЬ КОРПОРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ С ОГРАНИЧЕНИЕМ ПО ДЕФИЦИТНЫМ И ПРИРОДНЫМ РЕСУРСАМ

Рассмотрим модель корпорации, состоящую из m дочерних предприятий, выпускающих l видов продукции. Одна из основных задач центра состоит в разработке системы экономического регулирования деятельности подразделений и построении производственно-экономических взаимоотношений в корпорации, позволяющих обеспечить технологический процесс и максимальную заинтересованность каждого предприятия в выпуске конечной продукции.

Решение данной задачи заключается в разработке механизма согласования интересов, включающего в себя систему расчетных цен c_i^p , по которым центр и подразделения рассчитываются между собой за поставки комплектующих и готовой продукции (внешние расчеты производятся центром по рыночным ценам), и систему тарифов t_i^p , по которым центр продает предприятиям дефицитные и природные ресурсы.

Введем обозначения: $x_i = (x_{i1}, \dots, x_{il})$ — вектор валовой продукции i -го предприятия; $y_i = (y_{i1}, \dots, y_{il})$ — вектор товарной продукции, которую i -е предприятие продает внутри корпорации; $f_i = (f_{i1}, \dots, f_{ik_1}, \underbrace{0, \dots, 0}_{k_2})$ — вектор производственных ресурсов i -го предприятия; $q_i = (\underbrace{0, \dots, 0}_{k_1}, q_{i1}, \dots, q_{ik_2})$ — вектор дефицитных (энергия) и природных (вода, земля, лес) ресурсов i -го предприятия; $f_i + q_i$ — вектор факторов производства i -го предприятия; $X = (x_1, \dots, x_m)$ — полный вектор валовой продукции корпорации; $Q = (q_1, \dots, q_m)$ — полный вектор дефицитных и природных ресурсов корпорации; $Y = \sum_{i=1}^m y_i$ — суммарный вектор товарной продукции корпорации; $c = (c_1, \dots, c_l)$ — вектор рыночных цен; $s_i = (s_{i1}, \dots,$

$s_{il})$ — вектор себестоимости всех видов продукции; $d = (\underbrace{0, \dots, 0}_{k_1}, d_1, \dots, d_{k_2})$ — вектор цен, по которым центр получает дефицитные и природные ресурсы; $A_i = [a_{pr}^i]$ — матрица технологических коэффициентов i -го предприятия (a_{pr}^i — количество продукции вида p , затрачиваемое на производство единицы продукции вида r в i -м предприятии); $B_i = [b_{pr}^i]$ — матрица затрат факторов производства i -го предприятия (b_{pr}^i — количество фактора производства вида p , затрачиваемое на производство единицы продукции вида r в i -м предприятии); $D_i = [d_{pr}^i]$ — матрица коэффициентов пропорциональности выпуска товарной продукции (например, условия комплектности для i -го предприятия).

Пару (X, Q) назовем единым планом производственной деятельности объединения. Допустимым планом называется пара (X, Q) , для которой выполняются соотношения

$$x_i \geq 0, \quad q_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, m; \quad (1)$$

$$B_i x_i \leq f_i + q_i, \quad (2)$$

$$y_i = x_i - A_i x_i \geq 0, \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^m q_i \leq Q; \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^m D_i y_i = d_0. \quad (5)$$

Здесь (1) — естественное условие неотрицательности вектора валовой продукции и вектора дефицитных и природных ресурсов, (2) — ограничения по затратам факторов производства, (3) — продуктовый баланс (товарная продукция равна валовой продукции минус производственные затраты продукции) и условие неотрицательности конечной (товарной) продукции, (4) — ограничение по объему используемых дефицитных и природных ресурсов, (5) — ограничение на производство товарной продукции в подсистемах (производственный баланс).

Эффективность деятельности корпорации может оцениваться различными показателями (валовая продукция, производительность труда и др.), но наиболее общим показателем, соизмеряющим результаты производства и затраты всех видов ресурсов, служит прибыль. Она в наибольшей степени описывает и интересы центра, так как из прибыли корпорации и составляющих ее прибылей предприятий формируются фонды развития про-

изводства, материального поощрения, социально-культурных мероприятий и т. д.

Прибыль корпорации от продаж можно записать в виде $\pi(X, Q) = \langle c, Y \rangle - \sum_{i=1}^m \langle s_i, x_i \rangle - \sum_{i=1}^m \langle d, q_i \rangle$, где $\langle \cdot, \cdot \rangle$ — скалярное произведение двух векторов.

Преобразуем данное выражение:

$$\begin{aligned} \pi(X, Q) &= \langle c, \sum_{i=1}^m (x_i - A_i x_i) \rangle - \sum_{i=1}^m \langle s_i, x_i \rangle - \sum_{i=1}^m \langle d, q_i \rangle = \\ &= \langle c, \sum_{i=1}^m (E - A_i) x_i \rangle - \sum_{i=1}^m \langle s_i, x_i \rangle - \sum_{i=1}^m \langle d, q_i \rangle. \end{aligned}$$

В результате получим

$$\pi(X, Q) = \langle c, \sum_{i=1}^m G_i x_i \rangle - \sum_{i=1}^m \langle s_i, x_i \rangle - \sum_{i=1}^m \langle d, q_i \rangle, \quad (6)$$

где $G_i = E - A_i$, E — единичная матрица.

Оптимальным планом производственной деятельности корпорации назовем пару (X^0, Q^0) , доставляющую максимум функции (6) при ограничениях (1), (2), (4), (5).

Прибыль i -го предприятия можно записать в виде $\pi_i(x_i, q_i) = \langle c_i^p, y_i \rangle - \langle s_i, x_i \rangle - \langle t_i^p, q_i \rangle$, где c_i^p — вектор расчетных цен, t_i^p — вектор тарифов на ресурсы для i -го предприятия.

Прибыль i -го предприятия с учетом соотношения (3) примет вид

$$\pi(x_i, q_i) = \langle c_i^p, G_i x_i \rangle - \langle s_i, x_i \rangle - \langle t_i^p, q_i \rangle. \quad (7)$$

При этом i -е предприятие будет максимизировать прибыль (7) при ограничениях (1) и (2), а расчетные цены и тарифы служат управляющими параметрами экономического механизма, выбираемыми руководством корпорации. На эти цены может быть наложено условие финансового баланса

$$\sum_{i=1}^m \langle c_i^p, G_i x_i \rangle = \langle c, \sum_{i=1}^m G_i x_i \rangle. \quad (8)$$

Исследуем вопрос: можно ли выбрать расчетные цены и тарифы на дефицитные и природные ресурсы так, чтобы оптимальный план корпорации был оптимальным для каждого предприятия и выполнялся финансовый баланс? Оказывается, что единых для всех предприятий расчетных цен, удовлетворяющих первому условию, не существует, а тарифы на ресурсы — единые для всех предприятий. Дифференцированные по предприятиям расчетные цены, стимулирующие выполнение оптимального плана корпорации и удовлетворяющие

условию (8), существуют при весьма широких предположениях, причем выполнения условия (8) на оптимальном плане можно достичь при фиксированных ценах, а на любом плане — с помощью «плавающих» цен.

Теорема 1. Если $(X^0, Q^0) = (x_1^0, \dots, x_m^0, q_1^0, \dots, q_m^0)$ доставляет максимум функции (6) при ограничениях (1), (2), (4), (5) и $\pi(X^0, Q^0) > 0$ и матрицы G_i невырождены, то существуют такие векторы c_i^p и t_i^p , что (x_i^0, q_i^0) — решение задачи

$$\pi_i(x_i, q_i) = \langle c_i^p, G_i x_i \rangle - \langle s_i, x_i \rangle - \langle t_i^p, q_i \rangle \rightarrow \max \quad (9)$$

при ограничениях (1) и (2), причем на оптимальном плане выполняется условие финансового баланса

$$\sum_{i=1}^m \langle c_i^p, G_i x_i^0 \rangle = \langle c, \sum_{i=1}^m G_i x_i^0 \rangle. \quad (10)$$

Если дополнительно требуется выполнение финансового баланса для любого плана с положительной прибылью, т. е. условия (8), то расчетные цены и тарифы определяются в параметрическом виде: $c_i^p(\lambda)$, $t_i^p(\lambda)$. ♦

Доказательство. По теореме двойственности существует такие $\mu_0 \geq 0$, $\mu_1 \geq 0$, что (X^0, Q^0) — решение задачи максимизации функции Лагранжа

$$\begin{aligned} L(X, Q) &= \langle c, \sum_{i=1}^m G_i x_i \rangle - \sum_{i=1}^m \langle s_i, x_i \rangle - \sum_{i=1}^m \langle d, q_i \rangle + \\ &+ \langle \mu_0, \sum_{i=1}^m D_i y_i \rangle - \langle \mu_1, \sum_{i=1}^m q_i \rangle \end{aligned} \quad (11)$$

при ограничениях (1) и (2). Причем на оптимальном плане имеем $\langle \mu_1, \sum_{i=1}^m q_i^0 \rangle = \langle \mu_1, Q^0 \rangle$.

Преобразуем функцию (11) к виду $L(X, Q) = \sum_{i=1}^m \langle c + D_i^T \mu_0, G_i x_i \rangle - \sum_{i=1}^m \langle s_i, x_i \rangle - \sum_{i=1}^m \langle d + \mu_1, q_i \rangle$.

Задача максимизации функции (11) при ограничениях (1) и (2) распадается на m задач максимизации по x_i, q_i функций $L_i(x_i, q_i) = \langle c + D_i^T \mu_0, G_i x_i \rangle - \langle s_i, x_i \rangle - \langle d + \mu_1, q_i \rangle$.

Если положить $c_i^p = c + D_i^T \mu_0$, $t_i^p = d + \mu_1$ $\forall i = 1, \dots, m$, то $\pi_i(x_i, q_i) = L_i(x_i, q_i)$, т. е. (x_i^0, q_i^0) доставляет максимум (9) при ограничениях (1) и (2). При этом условие (8) или (10) выполняется при $\mu_0 = 0$.



Введем вспомогательный параметр $\lambda \in (0; 1]$ и положим

$$\begin{aligned} c_i^p &= \lambda(c + D_i^T \mu_0) + (1 - \lambda)s_i G_i^{-1}, \\ t_i^p &= \lambda(d + \mu_1). \end{aligned} \quad (12)$$

С учетом этих выражений имеем $\pi_i(x_i, q_i) = \lambda \langle c + D_i^T \mu_0, G_i x_i \rangle + (1 - \lambda) \langle s_i G_i^{-1}, G_i x_i \rangle - \langle s_i, x_i \rangle - \lambda \langle d + \mu_1, q_i \rangle = \lambda \langle c + D_i^T \mu_0, G_i x_i \rangle - \lambda \langle s_i, x_i \rangle - \lambda \langle d + \mu_1, q_i \rangle = \lambda L_i(x_i, q_i)$.

Следовательно, (x_i^0, q_i^0) — решение задачи максимизации (9) при ограничениях (1) и (2), $\lambda > 0$.

Покажем, что существует такое $\lambda \in (0; 1]$, при котором для c_i^p , определяемых из выражений (12) при $\lambda = \lambda^0$, выполняется условие финансового баланса (10). Для λ^0 имеем

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^m \langle \lambda^0(c + D_i^T \mu_0) + (1 - \lambda^0)s_i G_i^{-1}, G_i x_i^0 \rangle &= \\ &= \langle c, \sum_{i=1}^m G_i x_i^0 \rangle, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lambda^0 \sum_{i=1}^m \langle c + D_i^T \mu_0, G_i x_i^0 \rangle - \lambda^0 \sum_{i=1}^m \langle s_i, x_i^0 \rangle &= \\ &= \langle c, \sum_{i=1}^m G_i x_i^0 \rangle - \sum_{i=1}^m \langle s_i, x_i^0 \rangle. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Откуда } \lambda^0 &= \left(\langle c, \sum_{i=1}^m G_i x_i^0 \rangle - \sum_{i=1}^m \langle s_i, x_i^0 \rangle \right) \left(\sum_{i=1}^m \langle c + D_i^T \mu_0, G_i x_i^0 \rangle - \sum_{i=1}^m \langle s_i, x_i^0 \rangle \right)^{-1}. \end{aligned}$$

Так как $\pi(X^0, Q^0) > 0$, $\mu_0 \geq 0$, то $\lambda \in (0; 1]$, причем $\lambda^0 = 1$ только в случае $\mu_0 = 0$.

Если задавать расчетные цены и тарифы на ресурсы в виде (12), не фиксируя λ , то все равно (x_i^0, q_i^0) будут оптимальными планами для предприятий. При этом значение параметра λ устанавливается по фактическому плану из условия (8):

$$\begin{aligned} \lambda &= \left(\langle c, \sum_{i=1}^m G_i x_i \rangle - \sum_{i=1}^m \langle s_i, x_i \rangle \right) \times \\ &\times \left(\sum_{i=1}^m \langle c + D_i^T \mu_0, G_i x_i \rangle - \sum_{i=1}^m \langle s_i, x_i \rangle \right)^{-1}, \end{aligned}$$

если $\pi(X, Q) > 0$. Теорема доказана. ♦

Замечание. Для того чтобы матрицы G_i^{-1} существовали и, кроме того, выполнялись соотношения $s_i G_i^{-1} \geq 0$, достаточно, например, чтобы все собственные числа матриц A_i были по модулю меньше единицы. ♦

Из теоремы 1 вытекает, что при управлении в корпорации расчетными ценами и тарифами на дефицитные и природные ресурсы интересы верхнего (центра) и нижнего (предприятий) уровней идеально согласуемы.

Рассмотрим теперь различные варианты данной модели с некоторыми дополнительными ограничениями.

2. МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОРПОРАЦИИ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ОГРАНИЧЕНИЕМ ПО ДОПУСТИМОМУ УРОВНЮ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Предположим, что имеются K показателей, определяющих уровень загрязнения окружающей природной среды в результате производственной деятельности предприятий.

Введем дополнительно к параметрам рассмотренной модели следующие величины: $H_i = [h_{kr}^i]$ — матрица коэффициентов загрязнения i -го предприятия (h_{kr}^i — объем загрязнения по k -му показателю при производстве единицы продукции вида r в i -м предприятии); $Z = (Z_1, \dots, Z_K)$ — вектор предельно допустимых уровней загрязнения окружающей среды по каждому показателю.

План (X, Q) называется допустимым, если выполняются соотношения (1) — (5) и дополнительное ограничение по уровню загрязнения:

$$\sum_{i=1}^m H_i x_i \leq Z. \quad (13)$$

План (X^0, Q^0) назовем оптимальным, если он доставляет максимум функции (6) при ограничениях (1), (2), (4), (5) и (13).

Построим механизм согласования интересов, включающих в себя систему расчетных цен и тарифов на дефицитные и природные ресурсы, который согласует интересы внутри корпорации при дополнительном ограничении (13) для центра.

Для задачи (6) с условиями (1), (2), (4), (5) и (13) рассмотрим функцию Лагранжа

$$\begin{aligned} L^1(X, Q) &= \langle c, \sum_{i=1}^m G_i x_i \rangle - \sum_{i=1}^m \langle s_i, x_i \rangle - \sum_{i=1}^m \langle d, q_i \rangle + \\ &+ \langle \mu_0, \sum_{i=1}^m D_i y_i \rangle - \langle \mu_1, \sum_{i=1}^m q_i \rangle - \langle \mu_2, \sum_{i=1}^m H_i x_i \rangle, \end{aligned} \quad (14)$$

где μ_0 , μ_1 и μ_2 — векторные множители Лагранжа.

Теорема 2. Если $(X^0, Q^0) = (x_1^0, \dots, x_m^0, q_1^0, \dots, q_m^0)$ доставляет максимум функции (6) при ограничениях (1), (2), (4), (5), (13) и $\pi(X^0, Q^0) > 0$ и матрицы G_i невырождены, то существуют такие векторы c_i^p и t_i^p , что (x_i^0, q_i^0) — решение задачи максимизации (9) при ограничениях (1) и (2), причем на оптимальном плане выполняется условие финансового баланса (10). Если дополнительно требуется выполнение финансового баланса для любого плана с положительной прибылью, т. е. условия (8), то расчетные цены и тарифы определяются в параметрическом виде $c_i^p(\lambda)$, $t_i^p(\lambda)$ при $D_i^T \mu_0 - (G_i^{-1} H_i)^T \mu_2 \geq 0$. ♦

Доказательство. По теореме двойственности существуют такие $\mu_0 \geq 0$, $\mu_1 \geq 0$ и $\mu_2 \geq 0$, что (X^0, Q^0) — решение задачи максимизации функции Лагранжа (14) при ограничениях (1) и (2), причем на оптимальном плане имеют место равенства $\langle \mu_1, \sum_{i=1}^m q_i^0 \rangle = \langle \mu_1, Q \rangle$, $\langle \mu_2, \sum_{i=1}^m H_i x_i^0 \rangle = \langle \mu_2, Z \rangle$.

Преобразуем функцию Лагранжа (14) к виду

$$L^1(X, Q) = \sum_{i=1}^m \langle c + D_i^T \mu_0 - (G_i^{-1} H_i)^T \mu_2, G_i x_i \rangle - \sum_{i=1}^m \langle s_i, x_i \rangle - \sum_{i=1}^m \langle d + \mu_1, q_i \rangle.$$

Задача максимизации функции (14) при ограничениях (1) и (2) распадается на m задач максимизации по x_i, q_i функций $L_i^1(x_i, q_i) = \langle c + D_i^T \mu_0 - (G_i^{-1} H_i)^T \mu_2, G_i x_i \rangle - \langle s_i, x_i \rangle - \langle d + \mu_1, q_i \rangle$.

Если положить $c_i^p = c + D_i^T \mu_0 - (G_i^{-1} H_i)^T \mu_2 > 0$, $t_i^p = d + \mu_1 \forall i = 1, \dots, m$, то $\pi_i(x_i, q_i) = L_i^1(x_i, q_i)$, т. е. (x_i^0, q_i^0) доставляет максимум (9) при ограничениях (1) и (2). При этом условие (8) или (10) выполняется при $\mu_0 = 0$, $\mu_2 = 0$.

Введем вспомогательный параметр $\lambda \in (0; 1]$ и положим

$$c_i^p = \lambda(c + D_i^T \mu_0 - (G_i^{-1} H_i)^T \mu_2) + (1 - \lambda)s_i G_i^{-1}, \\ t_i^p = \lambda(d + \mu_1). \quad (15)$$

При условии (15) имеем $\pi_i(x_i, q_i) = \lambda \langle c + D_i^T \mu_0 - (G_i^{-1} H_i)^T \mu_2, G_i x_i \rangle + (1 - \lambda) \langle s_i G_i^{-1}, G_i x_i \rangle - \langle s_i, x_i \rangle -$

$$- \lambda \langle d + \mu_1, q_i \rangle = \lambda \langle c + D_i^T \mu_0 - (G_i^{-1} H_i)^T \mu_2, G_i x_i \rangle - \lambda \langle s_i, x_i \rangle - \lambda \langle d + \mu_1, q_i \rangle = \lambda L_i^1(x_i, q_i).$$

Следовательно, (x_i^0, q_i^0) — решение задачи максимизации (9) при ограничениях (1) и (2), $\lambda > 0$.

Полагая $\lambda = \left(\langle c, \sum_{i=1}^m G_i x_i \rangle - \sum_{i=1}^m \langle s_i, x_i \rangle \right) \left(\sum_{i=1}^m \langle c + D_i^T \mu_0 - (G_i^{-1} H_i)^T \mu_2, G_i x_i \rangle - \sum_{i=1}^m \langle s_i, x_i \rangle \right)^{-1}$, получа-

ем, что условие (8) будет выполняться $\forall (X, Q)$. Если $\pi(X, Q) > 0$ и $D_i^T \mu_0 - (G_i^{-1} H_i)^T \mu_2 \geq 0$, то $\lambda \in (0; 1]$. Если в правой части выражения для λ положить $x_i = x_i^0$, то соответствующее значение λ^0 обеспечит выполнение условия (10). Теорема доказана. ♦

3. МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОРПОРАЦИИ С КВОТАМИ ПО УРОВНЮ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Предположим, что существуют ограничения по уровню загрязнения окружающей среды, относящиеся непосредственно к конкретному предприятию:

$$\forall i = 1, \dots, m, \quad H_i x_i \leq \beta_i Z, \quad (16)$$

где $\beta_i > 0$, $i = 1, \dots, m$, $\beta_1 + \dots + \beta_i + \dots + \beta_m = 1$.

Коэффициенты β_i могут быть определены экспертно, исходя из информации, которой располагает центр (мощности предприятия, опасное или вредное производство и др.). Из ограничений (16) следует выполнение условия (13).

Оптимальным производственным планом корпорации назовем пару (X^0, Q^0) , доставляющую максимум функции (6) при ограничениях (1), (2), (4) и (5). При этом i -е предприятие будет максимизировать прибыль (7) при ограничениях (1), (2) и (16), а расчетные цены и тарифы на дефицитные и природные ресурсы служат управляющими параметрами экономического механизма, выбираемыми руководством корпорации.

Построим механизм согласования интересов, включающих в себя систему расчетных цен и тарифов на дефицитные и природные ресурсы, который согласует интересы внутри корпорации при дополнительном ограничении (16) для предприятий.

Для задачи (6) с условиями (1), (2), (4) и (5) рассмотрим функцию Лагранжа (11), а для задачи (9)



с условиями (1), (2) и (16) рассмотрим функцию Лагранжа

$$L_{0i}(x_i, q_i) = \langle c_i^p, G_i x_i \rangle - \langle s_i, x_i \rangle - \langle t_i^p, q_i \rangle - \langle v, H_i x_i \beta_i^{-1} \rangle, \quad (17)$$

где v — векторный множитель Лагранжа.

Теорема 3. Если $(X^0, Q^0) = (x_1^0, \dots, x_m^0, q_1^0, \dots, q_m^0)$ доставляет максимум функции (6) при ограничениях (1), (2), (4), (5) и $\pi(X^0, Q^0) > 0$ и матрицы G_i невырождены, то существуют такие векторы c_i^p и t_i^p , что (x_i^0, q_i^0) — решение задачи максимизации (9) при ограничениях (1), (2) и (16), причем на оптимальном плане выполняется условие финансового баланса (10). Если дополнительно требуется выполнение финансового баланса для любого плана с положительной прибылью, т. е. условия (8), то расчетные цены и тарифы определяются в параметрическом виде $c_i^p(\lambda)$, $t_i^p(\lambda)$ при $(G_i^{-1} H_i)^T v \beta_i^{-1} + D_i^T \mu_0 \geq 0$. ♦

Доказательство. По теореме двойственности существуют такие $\mu_0 \geq 0$, $\mu_1 \geq 0$, что (X^0, Q^0) — решение задачи максимизации функции Лагранжа (11) при ограничениях (1) и (2), причем на оптимальном плане имеет место равенство $\langle \mu_1, \sum_{i=1}^m q_i^0 \rangle = \langle \mu_1, Q \rangle$.

Преобразуем функцию Лагранжа (11) к виду

$$L(X, Q) = \sum_{i=1}^m \langle c + D_i^T \mu_0, G_i x_i \rangle - \sum_{i=1}^m \langle s_i, x_i \rangle - \sum_{i=1}^m \langle d + \mu_1, q_i \rangle. \quad (18)$$

Задача максимизации (18) при ограничениях (1) и (2) распадается на m задач максимизации по x_i, q_i функций $L_i(x_i, q_i) = \langle c + D_i^T \mu_0, G_i x_i \rangle - \langle s_i, x_i \rangle - \langle d + \mu_1, q_i \rangle$.

По теореме двойственности существует такое $v \geq 0$, что (x_i^0, q_i^0) — решение задачи максимизации функции Лагранжа (17) при ограничениях (1) и (2). Причем на оптимальном плане (x_i^0, q_i^0) имеет место равенство $\langle v, H_i x_i^0 \rangle = \langle v, \beta_i Z \rangle$.

Преобразуем функцию (17) к виду $L_{0i}(x_i, q_i) = \langle c_i^p - (G_i^{-1} H_i)^T v \beta_i^{-1}, G_i x_i \rangle - \langle s_i, x_i \rangle - \langle t_i^p, q_i \rangle$.

Если положить $c_i^p = c + D_i^T \mu_0 + (G_i^{-1} H_i)^T v \beta_i^{-1} > 0$, $t_i^p = d + \mu_1 \forall i = 1, \dots, m$, то $L_{0i}(x_i, q_i) = L_i(x_i, q_i)$, т. е.

(x_i^0, q_i^0) доставляет максимум (9) при ограничениях (1) и (2). При этом условие (8) или (10) выполняется при $\mu_0 = 0$, $v = 0$. Введем вспомогательный параметр $\lambda \in (0; 1]$ и положим

$$c_i^p = \lambda(c + D_i^T \mu_0) + (G_i^{-1} H_i)^T v \beta_i^{-1} + (1 - \lambda)s_i G_i^{-1}, \quad t_i^p = \lambda(d + \mu_1). \quad (19)$$

При условии (19) имеем $L_{0i}(x_i, q_i) = \langle \lambda(c + D_i^T \mu_0) + (G_i^{-1} H_i)^T v \beta_i^{-1} - (G_i^{-1} H_i)^T v \beta_i^{-1}, G_i x_i \rangle + (1 - \lambda) \times \langle s_i G_i^{-1}, G_i x_i \rangle - \langle s_i, x_i \rangle - \lambda \langle d + \mu_1, q_i \rangle = \lambda \langle c + D_i^T \mu_0, G_i x_i \rangle - \lambda \langle s_i, x_i \rangle - \lambda \langle d + \mu_1, q_i \rangle = \lambda L_i(x_i, q_i)$.

Следовательно, (x_i^0, q_i^0) — решение задачи максимизации (17) при ограничениях (1), (2) или, что то же, решение задачи максимизации (9) при ограничениях (1), (2) и (16), $\lambda > 0$.

Покажем, что существует такое $\lambda \in (0; 1]$, при котором для c_i^p , определяемых из выражения (19) при $\lambda = \lambda^0$, выполняется условие финансового баланса (10). Для λ^0 имеем

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^m \langle \lambda^0(c + D_i^T \mu_0) + (G_i^{-1} H_i)^T v \beta_i^{-1} + \\ & + (1 - \lambda^0)s_i G_i^{-1}, G_i x_i^0 \rangle = \langle c, \sum_{i=1}^m G_i x_i^0 \rangle, \\ & \lambda^0 \sum_{i=1}^m \langle c + D_i^T \mu_0, G_i x_i^0 \rangle - \lambda^0 \sum_{i=1}^m \langle s_i, x_i^0 \rangle = \\ & = \langle c, \sum_{i=1}^m G_i x_i^0 \rangle - \sum_{i=1}^m \langle s_i, x_i^0 \rangle - \\ & - \sum_{i=1}^m \langle (G_i^{-1} H_i)^T v \beta_i^{-1}, G_i x_i^0 \rangle. \end{aligned}$$

Откуда

$$\begin{aligned} \lambda^0 = & \left(\langle c, \sum_{i=1}^m G_i x_i^0 \rangle - \sum_{i=1}^m \langle s_i, x_i^0 \rangle - \right. \\ & \left. - \sum_{i=1}^m \langle (G_i^{-1} H_i)^T v \beta_i^{-1}, G_i x_i^0 \rangle \right) \times \\ & \times \left(\sum_{i=1}^m \langle c + D_i^T \mu_0, G_i x_i^0 \rangle - \sum_{i=1}^m \langle s_i, x_i^0 \rangle \right)^{-1}. \end{aligned}$$

Так как $\pi(X^0, Q^0) > 0$, $\mu_0 \geq 0$, $v \geq 0$, то $\lambda \in (0; 1]$, если $(G_i^{-1} H_i)^T v \beta_i^{-1} + D_i^T \mu_0 \geq 0$. Причем $\lambda^0 = 1$ только в случае $\mu_0 = 0$, $v = 0$.

Если задавать расчетные цены и тарифы на ресурсы в виде (19), не фиксируя λ , то все равно (x_i^0, q_i^0) будут оптимальными планами для предприятий. При этом значение параметра λ устанавливается по фактическому плану из условия (8):

$$\lambda = \left(\langle c, \sum_{i=1}^m G_i x_i \rangle - \sum_{i=1}^m \langle s_i, x_i \rangle - \sum_{i=1}^m \langle (G_i^{-1} H_i)^T v \beta_i^{-1}, G_i x_i \rangle \right) \times \left(\sum_{i=1}^m \langle c + D_i^T \mu_0, G_i x_i^0 \rangle - \sum_{i=1}^m \langle s_i, x_i \rangle \right)^{-1},$$

если $(G_i^{-1} H_i)^T v \beta_i^{-1} + D_i^T \mu_0 \geq 0$. Теорема доказана. ♦

4. МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КОРПОРАЦИИ С СИСТЕМОЙ ШТРАФОВ ЗА ПРЕВЫШЕНИЕ ДОПУСТИМОГО УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Рассмотрим корпорацию, в которой центр имеет право штрафовать предприятия, если показатели загрязнения окружающей среды в результате деятельности предприятий оказываются выше предельно допустимых. Пусть w — штраф за единицу превышения допустимого уровня загрязнения.

Оптимальным производственным планом корпорации назовем пару (X^0, Q^0) , доставляющую максимум функции (6) при ограничениях (1), (2), (4) и (5).

Прибыль i -го предприятия можно записать в виде

$$\tilde{\pi}_i(x_i, q_i) = \langle c_i^p, G_i x_i \rangle - \langle s_i, x_i \rangle - \langle t_i^p, q_i \rangle - w \max\{ \max_{k=1, \dots, K} (H_i x_i - \beta_i Z)_k, 0 \}, \quad (20)$$

где $(H_i x_i - \beta_i Z)_k$ означает k -ю компоненту вектора $H_i x_i - \beta_i Z$.

При этом i -е предприятие будет максимизировать прибыль (20) при ограничениях (1) и (2).

Построим механизм согласования интересов, включающих в себя систему расчетных цен и тарифов на дефицитные и природные ресурсы, который согласует интересы внутри корпорации при некоторой системе штрафов для предприятий.

Для задачи (6) с условиями (1), (2), (4) и (5) рассмотрим функцию Лагранжа вида (11). Компоненту вектора $H_i x_i - \beta_i Z$, соответствующую $\max_{k=1, \dots, K} (H_i x_i - \beta_i Z)_k$ для i -го предприятия, обозначим $k(i)$.

Теорема 4. Если $(X^0, Q^0) = (x_1^0, \dots, x_m^0, q_1^0, \dots, q_m^0)$ доставляет максимум функции (6) при ограничениях (1), (2), (4), (5) и $\pi(X^0, Q^0) > 0$ и матрицы G_i невырождены, то существуют такие векторы c_i^p и t_i^p , что (x_i^0, q_i^0) — решение задачи максимизации (20) при ограничениях (1) и (2), при любом фиксированном значении штрафа w , причем на оптимальном плане выполняется условие финансового баланса (10). Если дополнительно требуется выполнение финансового баланса для любого плана с положительной прибылью, т. е. условия (8), то расчетные цены и тарифы определяются в параметрическом виде: $c_i^p(\lambda)$, $t_i^p(\lambda)$.

Если $\max_{k=1, \dots, K} (H_i x_i^0 - \beta_i Z)_k$, то $c_i^p(\lambda)$, $t_i^p(\lambda)$ определяются при условии $w \beta_i Z_{k(i)} (l x_i)^{-1} G_i^{-1} \leq D_i^T \mu_0$, где $Z_{k(i)}$ — $k(i)$ -я компонента вектора Z , $(l x_i)^{-1}$ есть вектор $((l x_{i1})^{-1}, \dots, (l x_{ii})^{-1})$. ♦

Доказательство. По теореме двойственности существуют такие $\mu_0 \geq 0$, $\mu_1 \geq 0$, что (X^0, Q^0) — решение задачи максимизации функции Лагранжа (11) при ограничениях (1) и (2). Причем на оптимальном плане имеет место равенство $\langle \mu_1, \sum_{i=1}^m q_i^0 \rangle = \langle \mu_1, Q \rangle$. Преобразуем функцию (11) к виду (18). Задача максимизации функции (18) при ограничениях (1) и (2) распадается на m задач максимизации по x_i, q_i функций $L_i(x_i, q_i) = \langle c + D_i^T \mu_0, G_i x_i \rangle - \langle s_i, x_i \rangle - \langle d + \mu_1, q_i \rangle$.

Рассмотрим следующие случаи решения задачи (20).

- x_i^0 такое, что $\max_{k=1, \dots, K} (H_i x_i^0 - \beta_i Z)_k \leq 0$. Тогда, полагая $c_i^p = c + D_i^T \mu_0$, $t_i^p = d + \mu_1 \forall i = 1, \dots, m$, имеем $\tilde{\pi}_i(x_i^0, q_i^0) = L_i(x_i^0, q_i^0)$, т. е. (x_i^0, q_i^0) доставляет максимум (20) при ограничениях (1) и (2). При этом $\tilde{\pi}_i(x_i^0, q_i^0) = \pi_i(x_i^0, q_i^0)$. Значит, условие (8) или (10) выполняется при $\mu_0 = 0$. Если положить $\lambda^0 = \left(\langle c, \sum_{i=1}^m G_i x_i^0 \rangle - \sum_{i=1}^m \langle s_i, x_i^0 \rangle \right) \times \left(\sum_{i=1}^m \langle c + D_i^T \mu_0, G_i x_i^0 \rangle - \sum_{i=1}^m \langle s_i, x_i^0 \rangle \right)^{-1}$, то условие (8) будет выполнено $\forall (X, Q)$. Если $\pi(X^0, Q^0) > 0$, то $\lambda \in (0; 1]$. Если в правой части



выражения для λ положить $x_i = x_i^0$, то соответствующее значение λ^0 обеспечит выполнение условия (10).

- x_i^0 такое, что $(H_i x_i^0 - \beta_i Z)_{k(i)} = \max_{k=1, \dots, K} (H_i x_i^0 - \beta_i Z)_k > 0$. Прибыль i -го предприятия есть

$$\tilde{\pi}_i(x_i^0, q_i^0) = \langle c_i^p, G_i x_i^0 \rangle - \langle s_i, x_i^0 \rangle - \langle t_i^p, q_i^0 \rangle - w(H_i x_i^0 - \beta_i Z)_{k(i)}. \quad (21)$$

Преобразуем выражение (21) к виду $\tilde{\pi}_i(x_i^0, q_i^0) = \langle c_i^p, G_i x_i^0 \rangle - \langle s_i, x_i^0 \rangle - \langle t_i^p, q_i^0 \rangle - w(H_i x_i^0 - \beta_i Z)_{k(i)} + w\beta_i Z_{k(i)} = \langle c_i^p - w(G_i^{-1})^T(H_i)_{k(i)}, G_i x_i^0 \rangle - \langle s_i, x_i^0 \rangle - \langle t_i^p, q_i^0 \rangle + w\beta_i Z_{k(i)}$, где $(H_i)_{k(i)} - k(i)$ -я строка матрицы H_i .

Если положить $c_i^p = c + D_i^T \mu_0 + w(G_i^{-1})^T(H_i)_{k(i)} > 0$, $t_i^p = d + \mu_1 \forall i = 1, \dots, m$, то (x_i^0, q_i^0) доставляет максимум прибыли (21) при ограничениях (1) и (2). При этом условие (8) или (10) выполняется при $\mu_0 = 0$.

Введем вспомогательный параметр $\lambda \in (0; 1]$ и положим

$$\begin{aligned} c_i^p &= \lambda(c + D_i^T \mu_0) + w(G_i^{-1})^T(H_i)_{k(i)} - \\ &- w\beta_i Z_{k(i)}(lx_i)^{-1} G_i^{-1} + (1 - \lambda)s_i G_i^{-1}, \\ t_i^p &= \lambda(d + \mu_1). \end{aligned} \quad (22)$$

Тогда $\tilde{\pi}_i(x_i, q_i) = \langle \lambda(c + D_i^T \mu_0) + w(G_i^{-1})^T(H_i)_{k(i)} - w(G_i^{-1})^T(H_i)_{k(i)}, G_i x_i \rangle - \langle w\beta_i Z_{k(i)}(lx_i)^{-1} G_i^{-1}, G_i x_i \rangle + (1 - \lambda)\langle s_i G_i^{-1}, G_i x_i \rangle - \langle s_i, x_i \rangle - \lambda\langle d + \mu_1, q_i \rangle + w\beta_i Z_{k(i)} = \lambda\langle c + D_i^T \mu_0, G_i x_i \rangle - \lambda\langle s_i, x_i \rangle - \lambda\langle d + \mu_1, q_i \rangle = \lambda L_i(x_i, q_i)$.

Значит, (x_i^0, q_i^0) — решение задачи максимизации (21) при ограничениях (1) и (2), $\lambda > 0$. Если положить $\lambda = \left(\langle c, \sum_{i=1}^m G_i x_i \rangle - \sum_{i=1}^m \langle s_i, x_i \rangle + w\beta_i Z_{k(i)} \right) \times \left(\sum_{i=1}^m \langle c + D_i^T \mu_0, G_i x_i \rangle - \sum_{i=1}^m \langle s_i, x_i \rangle \right)^{-1}$, то условие (8) будет выполнено $\forall (X, Q)$. Если $\pi(X, Q) > 0$ и $w\beta_i Z_{k(i)}(lx_i)^{-1} G_i^{-1} \leq D_i^T \mu_0$, то $\lambda \in (0; 1]$. Если в правой части выражения для λ положить $x_i = x_i^0$, то со-

ответствующее значение λ^0 обеспечит выполнение условия (10). Теорема доказана. ♦

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

«Плавающие» расчетные цены и тарифы на дефицитные и природные ресурсы (с нефиксированным параметром λ), вообще говоря, представляют собой вид управления с обратной связью, а не программное управление. Еще один вид обратной связи появляется в расчетных ценах (22), которые зависят от фактических будущих значений x_i . Однако в рассмотренных моделях назначение обратной связи состоит только в выполнении финансового баланса, согласование интересов достигается и без нее, а оптимальное поведение нижнего уровня определяется оптимальным планом системы в целом. На практике такой механизм можно представить как схему итоговых расчетов за производственную деятельность, которые состоят из оплаты продукции и продажи дефицитных и природных ресурсов в течение некоторого промежутка времени по некоторым авансовым ценам и тарифам и доплат в конце промежутка времени по конечным результатам производственной деятельности корпорации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурков В.Н. Механизмы корпоративного управления. — М.: ИПУ РАН, 2004. — 109 с.
2. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. — М.: Физматлит, 2007. — 583 с.
3. Новиков Д.А., Иващенко А.А. Модели и методы организационного управления инновационным развитием фирмы. — М.: Ленанд, 2006. — 335 с.
4. Ашурбейли И.Р., Горелик А.Л., Горелик В.А. Производственные корпорации: проблемы формирования и управления. — М.: ПАТЕНТ, 2006. — 180 с.
5. Моисеев Н.Н. Модели экологии и эволюции. — М.: Знание, 1983. — 63 с.
6. Бурков В.Н., Дорохин В.В., Балашов В.Г. Механизмы согласования корпоративных интересов. — М.: ИПУ РАН, 2002. — 73 с.
7. Горелик В.А., Горелов М.А., Кононенко А.Ф. Анализ конфликтных ситуаций в системах управления. — М.: Радио и связь, 1991. — 286 с.
8. Горелик В.А., Кононенко А.Ф. Теоретико-игровые модели принятия решений в эколого-экономических системах. — М.: Радио и связь, 1982. — 144 с.
9. Акимов В.А., Лесных В.В., Радаев Н.Н. Риски в природе, технософере, обществе и экономике. — М.: Деловой экспресс, 2004. — 352 с.
10. Управление риском: Риск. Устойчивое развитие. Синергетика / В.А. Владимиров и др. — М.: Наука, 2000. — 429 с.

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

Золотова Татьяна Валерьяновна — канд. физ.-мат. наук, доцент, Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, ✉ tgold11@mail.ru.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА АДАПТАЦИИ ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ К ИЗМЕНЕНИЯМ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ

П.А. Михненко

Отмечено, что эффективная работа современных хозяйственных организаций оказывается возможной лишь в условиях их постоянной адаптации к изменяющимся условиям внешней среды. Показано, что в условиях адаптации в организационных системах с обратной связью интенсивность организационных преобразований зависит от математического ожидания определяющих факторов внешней среды и интенсивности информационной неопределенности. Рост неопределенности внешней среды влечет за собой либо необходимость снижения интенсивности преобразований, либо переход к стратегии упреждающей адаптации.

Ключевые слова: хозяйственная организация, адаптация, неопределённость, математическая модель, вероятностные характеристики, интенсивность преобразований.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях выживаемость и эффективность деятельности хозяйственных организаций возможны лишь в условиях постоянной адаптации к изменяющимся условиям внешней среды. В общем случае адаптация предполагает рост активности организации в направлении совершенствования своей внутренней среды в целях обеспечения определенного баланса с внешней средой [1–6].

К важнейшим принципам адаптивных организаций относятся работы [1, 4]: *принцип интерактивного планирования*, под которым понимается формирование динамических процедур оценивания степени соответствия внутренней среды организации требованиям, предъявляемым изменяющейся внешней средой; наличие *системы реализации решений*, обеспечивающей регистрацию ожиданий, обработку информации и рационализацию процесса принятия решения.

Интерактивное планирование предполагает выбор и рациональное распределение ресурсов, обеспечивающих заданное «приближение» состояния внутренней среды организации к требованиям, предъявляемым внешним окружением, а также определение периодов адаптационных преобразований, исполнителей и системы контроля [1, 4, 6].

При всем многообразии практических подходов к реализации принципов адаптации организационных систем, в большинстве работ, посвященных проблемам построения и функционирования хозяйственных организаций, адаптивность рассматривается как некоторый промежуточный критерий эффективности, значительно более абстрактный, чем уровень производства, производительность и удовлетворение запросам рынка [1, 2, 7–15]. Такой подход к анализу данной проблемы, по-видимому, и предопределяет отсутствие в этих работах указания на формализованные модели, позволяющие оценивать необходимый уровень интенсивности адаптивных преобразований в зависимости от значений факторов внешней среды.

Новизна настоящей работы заключается в том, что предлагаемая модель адаптации организации к изменениям внешней среды учитывает динамику процесса устранения рассогласований между запланированным состоянием и получаемыми результатами в стохастической постановке задачи исследования. Такая модель позволяет, путем применения метода вероятностных моментов, определить выражение для коэффициента интенсивности преобразований как функции средней скорости изменения внешней среды и интенсивности информационной неопределенности.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АДАПТАЦИИ ОРГАНИЗАЦИИ К ИЗМЕНЕНИЯМ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ

В настоящей статье, в контексте исследования свойств хозяйственных (рыночных) организаций, под адаптацией понимается стремление организации к постоянному уменьшению (в вероятностном смысле) отклонения своего состояния от требований, диктуемых изменениями внешнего окружения. В качестве негативного результата рассматривается как «отставание», так и «опережение» результатов работы организации относительно некоторого эталонного значения, определяемого состоянием соответствующего фактора внешней среды.

В данной постановке процесс адаптации организации к изменяющимся условиям внешней среды можно представить обобщенной схемой (рис. 1), где X — переменные внешней среды, изменение которых требует немедленной реакции организации (появления новых конкурентов; изменения потребительских предпочтений или покупательной способности населения; изменения законодательства, регламентирующего деятельность организации; появления новых базовых технологий производства и т. п.); Z_X — наблюдения переменных X с учетом возможной информационной неопределенности (информация СМИ, сообщения государственных органов, отчеты о деятельности других компаний, результаты маркетинговых исследований рынка и статистического анализа и т. п.); R — результаты адаптивных преобразований внутренней среды организации (диверсификация производства, выход на новые территориальные рынки, изменение структуры управления, перераспределение полномочий, реализация новых проектов и т. п.); Z_R — наблюдения (измерения) результатов адаптивных преобразований внутренней среды организации (мониторинг внутренней среды организации, отчеты руководителей структурных подразделений, собеседования с персоналом и т. п.); Z_Δ — результаты анализа отклонения состояния организации от требований, диктуемых

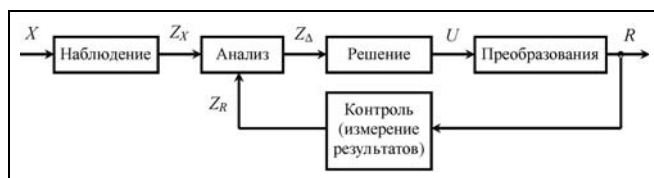


Рис. 1. Схема процесса адаптации внутренней среды организации к изменениям внешней среды

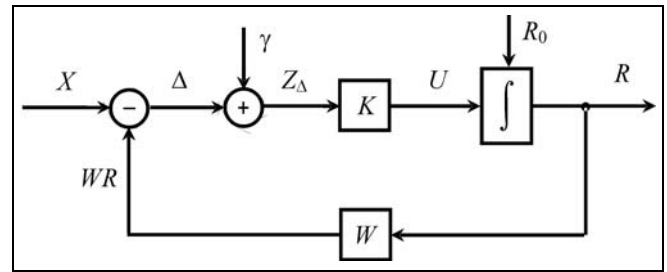


Рис. 2. Структурная схема процесса адаптации организации к изменениям внешней среды

изменениями внешнего окружения (результаты контрольных процедур, мнение высшего руководства, экспертные оценки и т. п.); U — управленческое решение, требующее осуществления адекватных преобразований во внутренней среде организации (планы, приказы, устные распоряжения, решения о закупках, внедрение новых технологий, делегирование полномочий и т. п.).

Для удобства дальнейшего исследования, структурная схема математической модели может быть приведена к следующему виду (рис. 2).

В рамках данной модели величина W представляет собой переменную согласования, определяющую соответствие текущего состояния организации требованиям внешней среды. Иными словами, переменная W задает систему интерактивного планирования, устанавливая соотношения и требуемый количественный уровень преобразований в зависимости от целей организации. Соответственно

$$\Delta = X - WR \quad (1)$$

есть динамическое рассогласование, т. е. отклонение результатов преобразований от требований системы интерактивного планирования.

Информация, необходимая для оценки возможного воздействия изменений в большинстве случаев, является не вполне достоверной в силу неопределенности проявления внешних изменений, а также из-за погрешностей работы подразделений, ответственных за оценку степени соответствия внутренней среды организации изменениям, происходящим во внешней среде. Поэтому в рассматриваемой модели случайная величина γ описывает информационную неопределенность — неточность информации об уровне рассогласования, имеющейся в распоряжении менеджмента организации.

Интегральная зависимость

$$R(t) = \int_{t_0}^t U(t) dt$$

описывает процесс накопления результатов преобразований внутри организации, в ответ на управленческое воздействие. Таким образом, на интервале времени преобразований $[t_0, t]$:

$$U = dR/dt. \quad (2)$$

Переменная K представляет собой коэффициент интенсивности адаптивных преобразований. Здесь понятие «интенсивность адаптивных преобразований» рассматривается в контексте теоремы Р. Эшби, интерпретированной для процессов управления хозяйственными организациями: «для того, чтобы успешно противостоять среде, сложность и быстрота принятия решений в фирме должны соответствовать сложности и скорости изменений, происходящих в среде [2]». Внутриорганизационная гибкость выражается в организации средств фирмы, позволяющей быстро и качественно переходить к новым видам продукции, выходить на новые рынки, эффективно оценивать поступающую информацию, обеспечивать психологическую устойчивость коллектива, эффективно использовать интеллектуальный потенциал менеджмента и сотрудников и т. п.

Таким образом, содержательно интенсивность преобразований может описываться затратами различных видов ресурсов (в широком смысле), выделяемых на обеспечение адаптации. В контексте настоящего исследования под ресурсами понимается весь комплекс средств, способных обеспечить процесс адаптивных организационных преобразований в соответствии с целями деятельности организации: материальными, финансовыми, человеческими (трудовые), информационными (интеллектуальные, включая технологии производства, оказания услуг и управления), административными (включая возможности делегирования и перераспределения полномочий и ответственности). Помимо прочего, в качестве одного из основных элементов потенциала организации, обеспечивающего возможность изменений, рассматривается ее структура¹. В рамках настоящей статьи не рассматриваются такие важные аспекты управления преобразованиями, как стоимость ресурсов, их источники и качество. Изучение этих вопросов представляет собой предмет дальнейших исследований в данном направлении.

Управляющая функция U определяется выражением $U = KZ_{\Delta}$, где $Z_{\Delta} = \Delta + \gamma$. С учетом выражения (1)

$$U = K(X - WR + \gamma). \quad (3)$$

¹ Точнее, чувствительность организационной структуры к изменениям во внешних условиях и управленческий потенциал менеджмента [2].

Продифференцируем по времени выражение (1), полагая, что на этапе запланированных преобразований переменная W не зависит от времени:

$$\frac{d\Delta}{dt} = \frac{dX}{dt} - W \frac{dR}{dt}.$$

С учетом формул (2) и (3) получим:

$$d\Delta/dt = V - WK(X - WR + \gamma), \quad (4)$$

где $V = dX/dt$ — скорость изменения (подвижность) внешней среды.

Как видно, скорость изменения рассогласования зависит от произведения переменных W и K , отражающего взаимосвязь таких организационных факторов, как цели и интенсивность (ресурсная обеспеченность) преобразований.

Выбор, широко известной в теории управления, стохастической модели следящей системы для исследования адаптивных возможностей хозяйственных организаций обусловлен достаточно высокой адекватностью этой модели при описании процессов, протекающих в компаниях органического типа, работающих в условиях высокоподвижной и неопределенной внешней среды [1, 4, 6, 16, 17]. Именно возможность гибкого реагирования на внешние изменения отличает такие организации от механистических структур, для которых характерна высокая инерционность и отсутствие необходимой гибкости [1, 2, 4—6, 8].

2. ОПТИМИЗАЦИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ АДАПТИВНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

Поставим задачу оптимизации интенсивности адаптивных преобразований. Примем допущение о центрированности случайной величины информационной неопределенности γ ($m_{\gamma} = 0$), полагая, что менеджменту организации удастся отслеживать и вовремя устранять систематические (повторяющиеся) погрешности оценивания рассогласования Δ .

Пользуясь методом вероятностных моментов применительно к уравнению (4), получим дифференциальные уравнения для математического ожидания m_{Δ} и дисперсии Θ_{Δ} рассогласования Δ :

$$dm_{\Delta}/dt = m_V - WKm_{\Delta}, \quad (5)$$

$$d\Theta_{\Delta}/dt = 2WK\Theta_{\Delta} + W^2K^2Q, \quad (6)$$

где m_V — математическое ожидание скорости изменения факторов внешней среды, $Q = D_{\gamma}$ — дисперсия переменной информационной неопределенности γ .



В общем случае алгоритм оптимизации коэффициента K включает в себя:

1) решение уравнений (5) и (6) в так называемом установившемся режиме² процесса адаптивных преобразований, когда изменения математического ожидания и дисперсии рассогласования становятся равными нулю:

$$m_{\Delta}^* \left(\frac{dm_{\Delta}}{dt} = 0 \right) = ? \text{ и } \Theta_{\Delta}^* \left(\frac{d\Theta_{\Delta}}{dt} = 0 \right) = ?;$$

2) обоснование критерия оптимальности, указывающего на стремление к управлению адаптацией, обеспечивающему минимум систематической и случайной составляющих рассогласования;

3) получение выражения для коэффициента K , в соответствии с выбранным критерием.

Таким образом, оптимизация переменной ресурсов по критерию минимума статистических характеристик рассогласования позволяет обосновать оптимальную интенсивность преобразований, направленных на адаптацию организации к изменениям факторов внешней среды.

Математическое ожидание, дисперсия и второй начальный момент рассогласования в установившемся режиме будут, соответственно, иметь вид:

$$m_{\Delta}^* = \frac{m_V}{WK}, \quad \Theta_{\Delta}^* = \frac{1}{2} WKQ,$$

$$\alpha_{2\Delta}^* = m_{\Delta}^{*2} + \Theta_{\Delta}^* = \left(\frac{m_V}{WK} \right)^2 + \frac{1}{2} WKQ.$$

На рис. 3 приведены графики зависимости статистических моментов рассогласования от интенсивности преобразований (ресурсного обеспечения процесса адаптации).

Как видно, увеличение интенсивности адаптивных преобразований вызывает снижение математического ожидания и рост дисперсии рассогласования. Следовательно, для каждой группы значений (m_V , W , Q), определяющих условия адаптации, можно найти оптимальное значение $K = K_{\text{opt}}$.

Получим выражение для оптимального значения коэффициента K_{opt} по критерию равенства математического ожидания и дисперсии рассогласования в установившемся режиме:

$$K_{\text{opt}} = \arg \{ m_{\Delta}^*(K) = \Theta_{\Delta}^*(K) \}.$$

² Установившийся режим преобразований характеризуется беспрерывностью и необратимостью процесса адаптивных преобразований на основе постоянно поступающей информации об изменениях внешней среды.

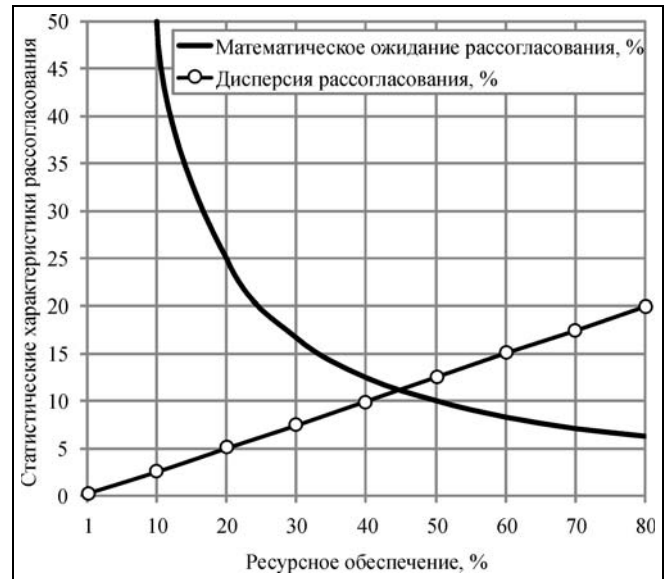


Рис. 3. Зависимости статистических моментов рассогласования от интенсивности преобразований (ресурсного обеспечения)

Данное условие характеризует такое соотношение величин m_{Δ}^* и Θ_{Δ}^* , при котором дальнейшее увеличение интенсивности K в целях снижения систематической ошибки m_{Δ}^* становится нецелесообразным из-за роста дисперсии Θ_{Δ}^* отклонений — см. рис. 3 (иными словами, оптимизация в данном случае заключается в минимизации функционала $\varphi(m_{\Delta}^*, \Theta_{\Delta}^*) = |m_{\Delta}^* - \Theta_{\Delta}^*| = \left| \frac{m_V}{WK} - \frac{1}{2} WKQ \right|$).

В этом случае $\frac{m_V}{WK} = \frac{1}{2} WKQ$, откуда $\frac{1}{2} QW^2K^2 - m_V = 0$.

Решив квадратное уравнение, получим:

$$K_{\text{opt}} = \frac{1}{W} \sqrt{\frac{2m_V}{Q}}. \quad (7)$$

Как видно, значение коэффициента интенсивности, оптимизированное по критерию равенства значений математического ожидания и дисперсии рассогласования, зависит от средней скорости изменения внешней среды и интенсивности информационной неопределенности, т. е. дисперсии измерений рассогласования.

Таким образом, чем выше средняя скорость изменений внешней среды, тем более интенсивным должно быть управление изменениями внутри организации, повышающими степень ее адаптивности. Однако увеличение информационной неопределенности в процессе анализа внешней среды

заставляет снижать интенсивность управления изменениями.

Наличие информации об оптимальном значении интенсивности (ресурсного обеспечения) преобразований позволит менеджменту организации формировать управленческие решения и выделять необходимые средства, обеспечивающие минимум отклонений результатов преобразований от требований, диктуемых изменениями внешней среды. Иными словами оптимальная интенсивность реакции организации на изменения позволяет избежать неэффективного расходования средств и необоснованных «скачков» результатов преобразований.

При этом уровень дисперсии информационных погрешностей в выражении (7) играет роль «коэффициента доверия измерениям». Снижение интенсивности преобразований из-за увеличения дисперсии обеспечивает переход организации в режим экономного управления адаптацией, существенно снижая тем самым риск получения неадекватных результатов.

3. УЧЕТ ОГРАНИЧЕНИЙ, НАЛАГАЕМЫХ НА УПРАВЛЯЕМОСТЬ ОРГАНИЗАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Выражение (7) для оптимальной интенсивности адаптивных преобразований получено при условии неограниченно высокой потенциальной скорости внутриорганизационных изменений $V_R = dR/dt$, позволяющей подразделениям эффективно осваивать весь объем ресурсов, выделяемых на каждом этапе преобразований. Такая модель условна и требует уточнения путем введения ограничения на величину V_R . На практике ограничение значения скорости преобразований может быть обусловлено рядом организационных факторов, наиболее значимые из которых [1, 2, 4, 6, 13]: неадекватность организационной структуры целям и задачам организации; неадекватность системы управления организации ее производственной структуре и технологиям; морально-психологический климат в коллективе организации, не обеспечивающий понимание работниками целей и задач преобразований; отсутствие адекватных мотивационных программ; чрезмерная централизация управления при многоуровневой вертикальной интеграции; неадекватный масштаб управляемости (излишне большая сфера контроля руководителей всех звеньев); несоответствующий характеру работ масштаб допустимых отклонений, принятый в системе контроля и др.

В данной модели рассматривалось отношение ограниченного значения скорости преобразова-

ний $V_{R\text{огр}}$ к максимально возможной скорости изменений внешней среды V_{max} .

Проведенные расчеты показали (рис. 4), что при увеличении этого отношения (т. е. при улучшении адаптивного потенциала организации) снижаются значения статистических характеристик отклонения и повышается математическое ожидание (имеется в виду математическое ожидание по числу циклов преобразований) интенсивности преобразований (т. е. среднее значение эффективно осваиваемых ресурсов).

Однако при определенных значениях влияющих факторов эти процессы выходят на «насыщение», что позволяет говорить о некотором «пороговом» значении скорости преобразований $V_{R\text{огр}}$, после которого дальнейшее улучшение адаптивных свойств организации (т. е. повышение ее организационной, производственной и рыночной гибкости) становится неоправданным.

Малые значения предельно возможных скоростей преобразований характерны для негибких в адаптационном смысле организационных систем. Накопление больших отклонений в таких организациях приведет к практической невозможности успешных адаптационных мероприятий даже при наличии достаточного количества ресурсов. При этом эффективная адаптация окажется возможной лишь в результате значительных (как правило, скачкообразных, революционных) структурных преобразований, обеспечивающих повышение потенциала скорости преобразований.

Малая предельно возможная скорость преобразований приводит к значительным текущим отклонениям результатов от требований внешней

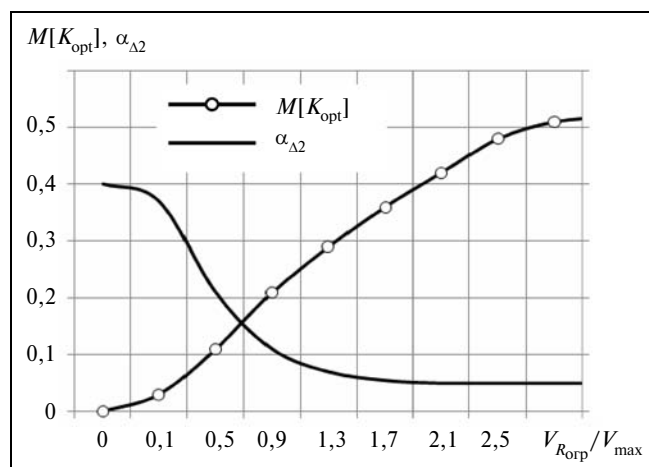


Рис. 4. Зависимости среднего значения $M[K_{\text{опт}}]$ интенсивности преобразований и второго начального момента $\alpha_{\Delta 2}$ значения рассогласования от отношения максимальных скоростей изменения внутренней и внешней сред

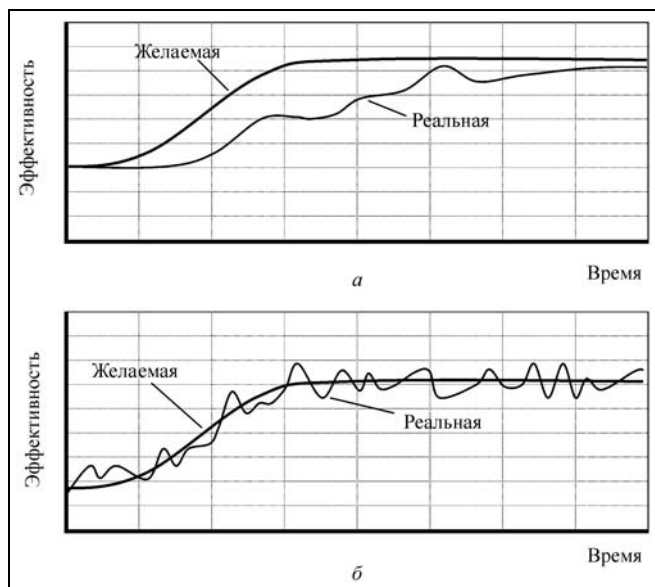


Рис. 5. Процесс адаптации организации в условиях оптимальной интенсивности преобразований (расчетный пример): низкий (а) и высокий (б) потенциал адаптации

среды (рис. 5, а), при этом кривая изменения результатов достаточно гладкая, что свидетельствует об отсутствии необоснованных «скачков» процесса преобразований.

Увеличение потенциала адаптации (максимально возможной скорости преобразований $V_{\text{орг}}$) снижает математическое ожидание и дисперсию рассогласования (рис. 5, б), однако способствует «проникновению» в процесс преобразований информационных погрешностей, в результате чего проявляются заметные «скачки» кривой реальной эффективности (текущих результатов адаптивных преобразований).

Хозяйственные организации обладают определенной степенью инерционности (запаздыванием реакции на управленческие воздействия), что приводит к сглаживанию управляемых процессов. Можно сказать, что организационная система «отфильтровывает» неблагоприятные высокочастотные колебания процесса преобразований.

4. АНАЛИЗ ЗОН АДАПТАЦИИ

При соблюдении условия (7) организация реализует оптимальную интенсивность преобразований. Здесь под 100 % интенсивности понимается максимально возможная интенсивность преобразований, позволяющая эффективно осваивать выделяемые ресурсы с учетом реальной управляемости (потенциала адаптации) организации.

Состояние внешней среды, одновременно учитывающее скорость изменения (подвижность)

и информационную неопределенность факторов, будем называть напряженностью внешней среды. На рис. 6 показано направление роста напряженности внешней среды.

Как следует из анализа соотношения (7), в зависимости от конкретных значений средней скорости m_V и неопределенности внешнего окружения Q , организация может находиться в одной из пяти зон напряженности (см. рис. 6). Как видно, крайне высокая и высокая интенсивности преобразований (зоны 1 и 2) обоснованы лишь при низком уровне неопределенности внешней среды.

Функционирование организации в условиях средней и высокой неопределенности внешней среды (в зонах напряженности 4 и 5) заставляет менеджмент искать пути целенаправленного снижения интенсивности преобразований, что позволяет достигать минимума статистических характеристик рассогласования путем «осторожных» (инкрементальных) изменений. Однако абсолютное значение характеристик рассогласования в этом случае, безусловно, окажется более высоким по сравнению с адаптацией в благоприятных в информационном смысле условиях. Тем не менее, необоснованное увеличение интенсивности преобразований (затрат ресурсов) в зонах 4 и 5, противоречащее требованию соотношения (7), неизбежно приведет к еще большему ухудшению статистических характеристик рассогласования.

Процесс адаптации, характеризующийся зонами 4 и 5, можно назвать «процессом осторожного преследования», в то время как зоны 1, 2 и 3 иллюстрируют процесс «энергичного управления изменениями».

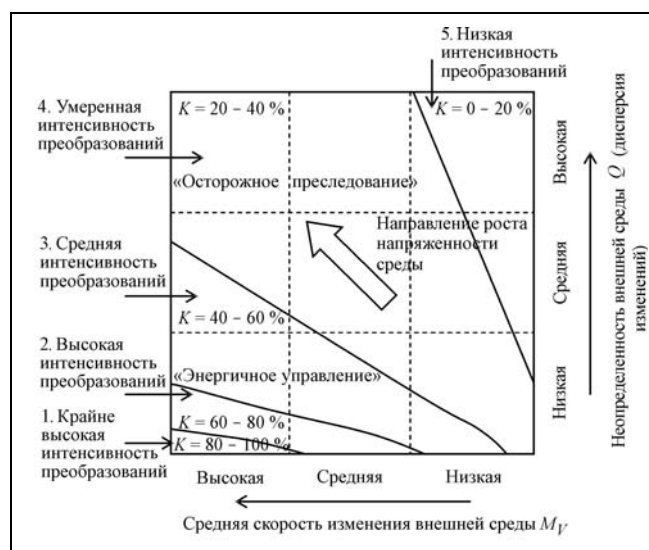


Рис. 6. Зоны адаптации

Вывод о необходимости управления изменениями с оптимальной интенсивностью $K = K_{\text{opt}}$ соответствует выводам И. Ансоффа [2] о том, что при нестабильностях высоких порядков³ организация должна осуществлять управление «по слабым сигналам», обеспечивающим своевременную реакцию на изменения. Очевидно, что такой подход к адаптации в условиях высокой напряженности (зоны 4 и 5) (см. рис. 6) не в полной мере отвечает целям и задачам современных органических структур с высоким потенциалом изменений, поскольку не позволяет им полностью использовать их адаптивные возможности. Это противоречие указывает на необходимость перехода таких организаций к проактивному (упреждающему) управлению изменениями, основанному на превентивных мерах. При этом большие уровни неопределенности предъявляют высокие требования к процессам обработки информации в системах управления такими организациями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наличие высокого динамического потенциала организационной системы является условием, обеспечивающим ее устойчивость и способность адаптироваться к изменяющимся условиям среды.

При наличии в организации замкнутого цикла управления по отклонениям, оптимизированного по критерию минимума статистических характеристик отклонений, интенсивность адаптивных преобразований представляет собой функцию от средней скорости изменения внешней среды и интенсивности информационной неопределенности.

Чем выше средняя скорость изменений внешней среды, тем более интенсивным должно быть управление изменениями внутри организации, повышающими степень ее адаптивности. Однако

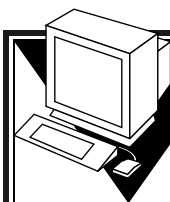
увеличение информационной неопределенности в процессе анализа внешней среды заставляет снижать интенсивность управления изменениями либо переходить к стратегии проактивной (упреждающей) адаптации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акофф Р.Л. Акофф о менеджменте / Сер.: «Теория и практика менеджмента». — СПб.: Питер, 2002.
2. Ансофф И. Стратегическое управление. — М.: Экономика, 1989.
3. Богданов А. Тектология. Всеобщая организационная наука. — М.: Экономика, 1989. — Т. 1.
4. Дафт Р. Теория организации. — М.: Юнити, 2006.
5. Мескон М., Альберт М., Хедоури Ф. Основы менеджмента. — М.: Дело, 2006.
6. Мильнер Б.З. Теория организации. — М.: Инфра-М, 2002.
7. Бык Ф.Л., Китушин В.Г. Механизмы развития и управление ими // Менеджмент в России и за рубежом. — 2008. — № 4.
8. Математические модели организаций / А.А. Воронин, М.В. Губко, С.П. Мишин, Д.А. Новиков. — М.: Ленанд, 2008.
9. Организации: поведение, структуры, процессы / Дж.Л. Гибсон и др. — М.: Инфра-М, 2000.
10. Мунин П.И., Мунина М.П., Мунин М.П. Менеджмент устойчивого развития (неопределенностно-информационный анализ) // Менеджмент в России и за рубежом. — 2008. — № 2.
11. Патлис А.Г. О моделировании управления производственным предприятием в условиях нестабильной внешней среды // Менеджмент в России и за рубежом. — 2006. — № 5.
12. Райченко А.В. Прикладная организация / Сер.: «Теория и практика менеджмента» — СПб.: Питер, 2003.
13. Организация и ее деловая среда. / В.Г. Смирнова, Б.З. Мильнер, Г.Р. Латфуллин, В.Г. Антонов. — М.: Инфра-М, 2000.
14. Проблемы организационной деятельности в условиях дефицита ресурсов / С.А. Сурков, Ю.П. Бойко, А.А. Хрупалов, А.М. Лукашев // Менеджмент в России и за рубежом. — 2007. — № 1.
15. Хохлова Т.П. Эволюция методологии организационного проектирования: динамическое горизонтальное структурирование // Менеджмент в России и за рубежом. — 2006. — № 4.
16. Дерузо П., Рой Р., Клоуз Ч. Пространство состояний в теории управления. — М.: Наука, 1970.
17. Малин А.С., Мухин В.И. Исследование систем управления. — М.: Изд. дом ГУ ВШЭ, 2004.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Д.А. Новиковым.

Михненко Павел Александрович — канд. техн. наук, зав. кафедрой, Московская финансово-промышленная академия, ☎(495) 663-93-88 (доб. 10-54), ✉pmihnenko@mfp.ru.



Внимание!

Наш новый адрес в Интернете: <http://pu.mtas.ru>

Редакция



МЕТОД ОЦЕНКИ ИНТЕГРИРОВАННОГО РИСКА ПОРТФЕЛЯ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ.

Ч. 2. Методические особенности оценки интегрированного риска портфеля инновационных проектов

И.В. Демкин, Д.В. Перцев

Предложен подход к решению проблемы оценки интегрированного риска и соответствующая методика, учитывающая эффекты синергии и каннибализма.

Ключевые слова: портфель, инновационный проект, модель, синергия, каннибализм, риск.

ВВЕДЕНИЕ

В первой части [1] данной работы были рассмотрены основные предпосылки создания метода оценки интегрированного риска портфеля инновационных проектов. В частности, был проведен анализ основных подходов к решению проблемы оценки интегрированного риска, разработана оригинальная типология взаимозависимости проектов в портфеле, а также рассмотрены в общих чертах особенности метода оценки интегрированного риска портфеля инновационных проектов. На основе проведенного анализа далее будут рассмотрены методические особенности построения модели денежных потоков и оценки интегрированного риска портфеля инновационных проектов промышленной компании.

1. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ ДЕНЕЖНЫХ ПОТОКОВ И ОЦЕНКИ ИНТЕГРИРОВАННОГО РИСКА ПОРТФЕЛЯ НЕЗАВИСИМЫХ ПРОЕКТОВ

В случае независимости проектов денежный поток портфеля равен сумме денежных потоков составляющих портфель проектов.

Для простоты рассмотрим методические особенности построения модели денежных потоков портфеля независимых инновационных проектов при следующих допущениях и оценках:

- моменты запуска проектов портфеля совпадают;
- инвестиционные затраты приведены к моменту запуска проектов;
- оценены продолжительности и инвестиционные затраты на выполнение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) каждого проекта;
- оценены вероятности успеха НИОКР каждого проекта портфеля;
- оценены ценности бизнеса каждого проекта, получаемого в случае успеха НИОКР проекта.

Модель денежных потоков достаточно легко может быть модифицирована с учетом различных моментов запуска проектов. Остальные оценки могут быть выполнены на основе методических положений и моделей оценки риска инновационных проектов [2, 3].

В этих предположениях чистая текущая стоимость инвестиций в портфель независимых инновационных проектов $NPV_{\text{портф}}$ при постоянной норме дисконта j (значение нормы дисконта в модели совпадает со значением безрисковой процентной ставки [4]) может быть оценена следующим образом¹:

$$NPV_{\text{портф}} = - \sum_{i \in I} z_i + \sum_{i \in I} ЦБ_i x_i (1+j)^{-t_i}, \quad (1)$$

¹ Модель денежных потоков и оценки интегрированного риска в случае стратегии поэтапного инвестирования в инновационные проекты см. далее.

где Z_i — инвестиционные затраты в НИОКР по проекту i , $ЦБ_i$ — ценность бизнеса проекта i в случае успеха НИОКР, t_i — продолжительность НИОКР проекта i , x_i — случайный параметр, имеющий рас-

пределение Бернулли: $x_i = \begin{cases} 1 & \text{с вероятностью } p, \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$

p_i — вероятность удачи НИОКР i -го проекта; I — множество всех независимых инновационных проектов портфеля.

Выбор распределения Бернулли объясняется возможностью получения ценности бизнеса по инновационным проектам лишь в случае успеха их НИОКР. В противном случае (в случае неудачи НИОКР), промышленные компании (концерны, холдинги), как правило, несут ущерб в размере средств, вложенных в инновационные проекты, за вычетом незначительной ликвидационной стоимости, и никакой ценности бизнеса инвесторы не получают. Таким образом, воздействие факторов риска на этапе НИОКР инновационного проекта отражается на случайном характере получения его ценности бизнеса, а именно:

— для инвесторов компании будет получена ценность бизнеса с вероятностью успеха НИОКР p_i ;

— с дополнительной вероятностью $1 - p_i$ ценность бизнеса не будет получена.

В модели (1) может быть учтен результат реализации инновационных проектов в прошлом. Для этого необходимо рассмотреть два следующих основных случая.

1. Успешно завершены лишь начальные этапы (например, этап научно-исследовательских работ) ранее инициированного инновационного проекта.

2. Основным результатом реализации ранее инициированного инновационного проекта является ценность бизнеса. По сути, в этом случае такой проект ничем не отличается от инвестиционного проекта.

Предположим, что начальные этапы НИОКР по проекту s успешно завершены (случай 1). В качестве величин Z_s и t_s модели необходимо взять инвестиционные затраты и продолжительность еще незавершенных заключительных этапов НИОКР проекта s .

Во втором случае для ранее инициированного инновационного проекта s в рассматриваемой модели можно положить $Z_s = 0$, $t_s = 0$, $x_s = 1$.

Случайное распределение чистой текущей стоимости инвестиций может быть оценено на осно-

ве распределений величин Z_i , $ЦБ_i$, и t_i методом имитационного моделирования. Оценивание распределений инвестиционных затрат и продолжительности НИОКР можно получить по методике, изложенной в работах [2, 3]. Ценность бизнеса инновационного проекта будет совпадать с суммарными дисконтированными денежными потоками этапа производства и продаж инновационной продукции. Для учета воздействия на ценность бизнеса рыночных факторов риска можно воспользоваться моделями геометрического броуновского движения, возвращения к среднему уровню и другими моделями [4].

Определенный интерес представляет вырожденный случай, для которого решение задачи оценки интегрированного риска может быть получено аналитически. Предположим, что инвестиционные затраты в НИОКР каждого проекта портфеля равны друг другу. Это же можно сказать в отношении ценности бизнеса, продолжительности и вероятности удачи НИОКР. Для этого гипотетического случая выражение (1) может быть преобразовано следующим образом:

$$NPV_{\text{портф}} = -nZ + ЦБ(1+j)^{-t}, \quad (2)$$

где Z — инвестиционные затраты по любому проекту, n — число проектов в портфеле; $ЦБ$ — ценность бизнеса проекта в случае успеха НИОКР, t — продолжительность НИОКР проекта; p — вероятность удачи НИОКР проекта; y — случайная величина, имеющая биномиальное распределение с параметрами n , p .

Из выражения (2) можно определить вероятность того, что чистая текущая стоимость инвестиций в портфель независимых проектов будет отрицательной:

$$P(NPV_{\text{портф}} < 0) = P\left(y < \frac{nZ}{ЦБ(1+j)^{-t}}\right). \quad (3)$$

Например, если в формуле (3) положить $n = 40$, $ЦБ = 200$, $Z = 10$, $j = 0$, $p = 0,1$, то получим вероятность реализации неэффективного портфеля, составленного из сорока независимых проектов, равную $f_y(0) + f_y(1) \approx 0,08$ (здесь $f_y(n)$ — функция плотности биномиального распределения с параметрами n , p). Таким образом, в данном случае при высокой вероятности неудачи каждого проекта (0,9), инвестиции в портфель, составленный из сорока независимых проектов, позволят снизить вероятность реализации неэффективного портфеля примерно до 0,08.



2. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ ДЕНЕЖНЫХ ПОТОКОВ И ОЦЕНКИ ИНТЕГРИРОВАННОГО РИСКА ПОРТФЕЛЯ ВЗАИМОЗАВИСИМЫХ ПРОЕКТОВ

2.1. Обобщенная модель оценки интегрированного риска портфеля взаимозависимых проектов

Обобщенная модель оценки чистой текущей стоимости инвестиций в портфель взаимозависимых инновационных проектов $NPV_{\text{портф}}$ при постоянной норме дисконта j может быть записана следующим образом:

$$NPV_{\text{портф}} = - \sum_i Z_i + \sum_i ЦБ_i x_i (1+j)^{-t_i} + \mathcal{E}_c - \mathcal{E}_k, \quad (4)$$

где $\mathcal{E}_c$ и $\mathcal{E}_k$ — соответственно абсолютные величины синергетического эффекта и эффекта каннибализма от инвестиций в портфель взаимозависимых инновационных проектов компании.

Проблема заключается в построении методики оценки величин $\mathcal{E}_c$ и $\mathcal{E}_k$, которая бы учитывала специфику источников синергии и каннибализма в каждом конкретном варианте портфеля проектов.

Предложена модель построения совокупного денежного потока портфеля на основе матрицы коэффициентов попарной взаимозависимости проектов [5]. Каждый коэффициент предлагаемой матрицы оценивается экспертами и показывает степень зависимости одного проекта i от другого проекта k (i и k — номера строки и столбца матрицы). Источники каннибализма (перекрывание результатов и последовательная зависимость проектов) учитываются в модели распределением ожидаемого дохода между взаимозависимыми проектами пропорционально значениям коэффициентов взаимозависимости.

К недостаткам этой модели можно отнести:

- учет лишь двух источников взаимозависимости;
- экспертная оценка значений коэффициентов матрицы взаимозависимости проектов достаточно проблематична;
- невозможность учета многих эффектов множественной каннибализации.

Предложенная модель позволяет учесть лишь попарную взаимозависимость проектов. Однако ее нельзя использовать в случаях, если доходы по некоторому проекту зависят от успешности двух или более проектов.

2.2. Модель оценки интегрированного риска портфеля взаимозависимых проектов на основе дифференцированного учета источников синергии

Представляет интерес построение методики построения денежных потоков и оценки интегрированного риска портфеля взаимозависимых про-

ектов, которая бы дифференцированно учитывала бы источники синергии и каннибализма по сравнению с моделью [5] и была бы лишена недостатков последней.

В этой связи покажем особенности построения модели денежных потоков портфеля инновационных проектов с учетом следующих выявленных взаимозависимостей.

- *Технологическая синергия.* В качестве примера технологической синергии включим в портфель проект внедрения нового таблет-пресса в фармацевтической компании. В случае удачи такого проекта у компании появится возможность существенного снижения себестоимости изготовления всей линейки таблеточного производства продукции. При сохранении спроса и цены на таблеточные препараты снижение себестоимости приведет к увеличению денежных потоков компании и, следовательно, к росту ценности бизнеса проектов таблеточного производства.

- *Последовательная зависимость проектов.* Результаты по ряду продуктовых проектов таблеточного производства определяются успешностью проекта внедрения нового таблет-пресса в компании.

Для простоты введем следующие допущения и оценки, не снижающие ценность модели:

- портфель включает в себя n продуктовых инновационных проектов, связанных с разработкой и освоением новых таблеточных препаратов и проект внедрения нового таблет-пресса. Последний проект оказывает влияние на все продуктовые проекты и дополнительной самостоятельной ценности бизнеса не создает;
- моменты запуска всех проектов совпадают;
- оцененные инвестиционные затраты в НИОКР приведены к моменту начала соответствующих проектов;
- оценены продолжительности и инвестиционные затраты в НИОКР каждого проекта портфеля;
- оценены вероятности успеха НИОКР каждого проекта портфеля;
- оценены ценности бизнеса каждого проекта, получаемые в случае успеха его НИОКР в двух случаях, когда проект внедрения таблет-пресса:
 - завершился успехом;
 - потерпел неудачу — в этом случае себестоимость изготовления таблеточных препаратов не снизится.

В расчетных целях введем коэффициент технологической синергии проекта α_p , показывающий, во сколько раз возрастет ценность бизнеса, получаемая при удачном завершении его НИОКР, а также проекта внедрения таблет-пресса по сравнению с ценностью бизнеса, полученной только лишь в случае успеха одного продуктового проекта.

В этих условиях выражение для чистой текущей стоимости инвестиций в портфель взаимозависимых проектов записывается следующим образом:

$$NPV_{\text{портф}} = - \sum_{i=0}^n Z_i + \sum_{i=1}^n CB_i(1+j)^{-t_i}(1-x_0)x_i + \sum_{i=1}^n CB_i\alpha_i(1+j)^{-t_i}x_0x_i, \quad (5)$$

где i — порядковый номер проекта (проект внедрения таблет-пресса имеет номер 0), Z_0 — инвестиционные затраты в проект внедрения таблет-пресса, приведенные к моменту его запуска; x_0 — случайный параметр, имеющий распределение

Бернулли: $x_0 = \begin{cases} 1 & \text{с вероятностью } p_0, \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$; p_0 — ве-

роятность удачи проекта внедрения таблет-пресса.

Остальные обозначения совпадают с обозначениями, рассмотренными ранее для модели независимых проектов.

Первое слагаемое в выражении (5) представляет собой взятые с отрицательным знаком общие инвестиционные затраты (приведенные к моменту запуска проектов) в портфель проектов, осуществляемые вне зависимости от успеха последних. Второе слагаемое представляет собой суммарную дисконтированную ценность бизнеса от инвестиций в портфель проектов в случае неудачи проекта внедрения таблет-пресса. В этом случае эффекта от технологической синергии не будет, поскольку проект внедрения таблет-пресса потерпит неудачу. Наконец, последнее слагаемое представляет собой суммарную дисконтированную ценность бизнеса инвестиций в случае удачи проекта внедрения таблет-пресса.

Заметим, что в модели (5) использована методология построения дизъюнктивных нормальных форм булевой алгебры (в нашем случае своеобразным эквивалентом логической операции отрицания служит операция вычитания из единицы). Это вполне допустимо ввиду двоичной природы параметров x_i модели.

Выражение (5) может быть записано в следующем эквивалентном векторном виде:

$$NPV_{\text{портф}} = -\vec{z}\vec{E} + \vec{x}\vec{B} + x_0\vec{x}\vec{C}, \quad (6)$$

где $\vec{x}$ — вектор-строка, элемент которого совпадает с x_i ; $\vec{B}$ — вектор-столбец, элемент которого совпадает с дисконтированной ценностью бизнеса i -го проекта, т. е. $CB_i(1+j)^{-t_i}$; $\vec{C}$ — вектор-столбец, элемент которого совпадает с размером синергетического эффекта от влияния на проект i , т. е.

$CB_i(1+j)^{-t_i}(\alpha_i - 1)$; $\vec{E}$ — единичный вектор-столбец; $\vec{z}$ — вектор-строка приведенных инвестиционных затрат по проекту i .

Остановимся далее на учете в модели оценки источников каннибализма. Инвесторов компании будет интересовать размер каннибализационного эффекта в первую очередь, поскольку в ходе принятия инвестиционных решений ими оцениваются, прежде всего, пессимистические сценарии (наихудшие прогнозы). Логика многих инвесторов заключается в следующем: «Если в пессимистических сценариях инвестиции эффективны, то и они будут тем более эффективны в остальных случаях».

2.3. Модель оценки интегрированного риска портфеля взаимозависимых проектов на основе учета источников каннибализма

Наряду с рассмотренными источниками синергии в модели нетрудно учесть перекрытие результатов ряда проектов, которое является существенным источником каннибализма, что подтверждается практикой управления портфелями инновационных проектов [5]. Предположим, что на основе модели Сринивасана получены значения коэффициентов каннибализационного массива $k_{i,S\setminus\{i\}}$ ($S \subset \{1, 2, \dots, n\}$). Отдельный элемент такого массива показывает, во сколько раз снизится ценность бизнеса проекта i при условии успешного завершения НИОКР этого проекта, а также в случае успеха НИОКР проектов множества $S\setminus\{i\}$. Для простоты модельных построений положим $k_{i,\emptyset} = 1$. Если проекты не взаимозависимые, то положим соответствующий каннибализационный коэффициент равным единице.

Если оценить значения элементов каннибализационного массива не удастся, то возможно получение оценок снижения спроса на продукцию в случае успеха НИОКР взаимозависимых проектов. Используя методологию дисконтированных денежных потоков [4], нетрудно получить необходимые оценки коэффициентов каннибализации.

В этих условиях модель оценки интегрированного риска портфеля проектов может быть записана следующим образом:

$$NPV_{\text{портф}} = - \sum_{i=1}^n Z_i + \sum_{S \subset \{1, 2, \dots, n\}} \prod_{p \in S} x_p \prod_{q \notin S} (1 - x_q) \sum_{i \in S} \frac{CB_i(1+j)^{-t_i}}{k_{i,S\setminus\{i\}}}. \quad (7)$$

Первое слагаемое, как и ранее, представляет собой взятые с отрицательным знаком общие инвестиционные затраты в портфель проектов, осуществляемые вне зависимости от успеха последних.



Вторая сумма берётся по всем подмножествам S множества индексов проектов портфеля. Отдельные слагаемые в последнем случае представляют собой дисконтированную ценность бизнеса проекта i , вычисленную с учетом каннибализационного эффекта и при условии успешного выполнения НИОКР лишь данного проекта и проектов из подмножества S . Таким образом, совокупность отдельных слагаемых последней суммы модели (7) образует полную группу несовместных событий. В зависимости от реализуемых на этапах НИОКР рисков, конкретный перечень проектов успешно пройдет этапы НИОКР и, следовательно, ровно одно слагаемое во второй сумме выражения (7) будет отлично от нуля. Это подтверждает корректность составления представленной математической модели.

Как видно из моделей (4)–(7), получаемый положительный эффект от синергии в ходе реализации проектов портфеля может быть частично или полностью нивелирован отрицательным эффектом от перекрытия результатов ряда проектов.

Дальнейшая дифференциация в учете эффектов синергии и каннибализма, а также рост числа взаимозависимых проектов приводит, с одной стороны, к возрастанию сложности модели (росту числа ее переменных и слагаемых), а с другой стороны, к росту объемов оцениваемых данных, например коэффициентов каннибализации.

3. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ИНТЕГРИРОВАННОГО РИСКА

Для оценки распределения чистой текущей стоимости инвестиций в портфель на основе моделей (6) или (7) можно воспользоваться методологией имитационного моделирования Монте-Карло, реализованной программно, например, в пакете Crystal Ball [4]. Для этого достаточно выполнить следующие действия.

1. Задать функциональную зависимость $NPV_{\text{портф}}$ от ее основных параметров, используя выражения (4), (5) или (6).

2. Определить вероятностные распределения основных параметров модели. Распределения инвестиционных затрат и продолжительности НИОКР инновационных проектов могут быть получены на основе построения сетевых и имитационных моделей [2–3]. Таким же образом можно определить вероятности успеха НИОКР. Для оценки распределения ценности бизнеса проектов можно использовать модели денежных потоков, а также имитационное моделирование [4]. Коэффициенты взаимозависимостей проектов могут быть оценены экспертно.

3. Провести статистические испытания и оценить распределение чистой текущей стоимости инвестиций в портфель инновационных проектов.

3.1. Методические особенности оценки ценности бизнеса проекта

Оценка ценности бизнеса проекта подробно изложена в работе [4]. Алгоритм имитационного моделирования ценности бизнеса проекта $ЦБ_i$ включает в себя следующие основные шаги.

1. Построить модель денежных потоков этапа производства и продаж инновационной продукции D_t как функции цены, объема продаж, стоимости материальных ресурсов, заработной платы, необходимых оборотных средств в каждый момент времени t расчетного периода и др.

2. Задать функциональную зависимость ценности бизнеса проекта от денежных потоков:

$ЦБ = \sum_t D_t(1+j)^{-t}$, где j — норма дисконта, равная требуемой норме доходности проекта.

3. Определить вероятностные распределения основных параметров модели денежных потоков.

4. Провести статистические испытания и оценить распределение ценности бизнеса проекта.

4. АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА НА ФАРМАЦЕВТИЧЕСКОМ ПРЕДПРИЯТИИ

Предлагаемый метод оценки был апробирован для портфеля инновационных проектов разработки и освоения новых препаратов (линия антибиотиков) в фармацевтической промышленной компании. В ходе исследования решались следующие две основные задачи:

— оценка эффективности существующих бизнес-процессов разработки и освоения новых препаратов и оценка рисков отдельных этапов инновационных проектов портфеля;

— оценка интегрированного риска портфеля инновационных проектов.

В качестве документальной базы исследования были выбраны существующие в компании бизнес-процессы разработки и освоения новых препаратов. По функциональному признаку выделены три основных этапа процесса разработки и освоения нового препарата (инновационного проекта):

— подробное исследование перспективных препаратов и принятие решений о целесообразности разработки и освоения препарата;

— разработка документации, проведение испытаний и регистрация препарата;

— освоение нового препарата в производстве и его продвижение на рынок.

Менеджментом компании были определены основные факторы риска процессов разработки и освоения новых препаратов. К числу таких факторов риска менеджеры компании отнесли:

— негативные результаты проведенных научных исследований;

- ошибки на этапе разработки;
- ошибки при выборе технологического оборудования (неудовлетворительное качество оборудования);
- неудовлетворительную рыночную ситуацию (или неудовлетворительное продвижение препарата), приводящую к снижению спроса на препарат;
- отказ в регистрации препарата или выдачи лицензии по субъективным причинам;
- отрицательный результат государственного контроля;
- затягивание сроков проведения строительно-монтажных работ.

В целях оценки вероятности успеха, продолжительности и издержек каждого этапа инновационных проектов разработки и освоения новых препаратов с участием менеджмента компании были построены стохастические модели отдельных этапов проектов и выполнен количественный анализ риска [2]. Полученные основные результаты анализа приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные количественные результаты анализа риска

№ этапа проекта	Вероятность успеха (при условии успешного завершения предыдущего этапа), P_i	Ожидаемые издержки (ед. ст.), приведенные к началу этапа C_p , ед.	Ожидаемая продолжительность, t_p , сут
1	0,2	2	28
2	0,85	936	427
3	0,98	2680	224

Таблица 2

Основные результаты исследования

Показатель	Значение для единственного инновационного проекта	Значение для портфеля, составленного из 30-ти инновационных проектов
Вероятность получения отрицательного значения NPV , %	84,2	11
Ожидаемое значение NPV , тыс. ед.	584	20 700
Ожидаемые потери, тыс. ед.	–31	–660
Ожидаемый выигрыш, тыс. ед.	615	21 400
Коэффициент ожидаемых потерь, $\times 100$ %	4,8	3

Представленные результаты подтвердили высокую эффективность существующих бизнес-процессов компании. Высокая вероятность неудачи относится лишь к начальным этапам инновационного проекта. При этом понесенный вследствие реализации незавершенных проектов ущерб незначителен для компании в целом.

Оценка интегрированного риска инновационного проекта компании была выполнена на основе следующей модели:

$$NPV = - \sum_{p=1}^v \left(\prod_{q < p} x_q (1 - x_p) \sum_{q=1}^p \frac{C_q}{(1+j)^l} \right) - \prod_{q=1}^v x_q \sum_{q=1}^v \frac{C_q}{(1+j)^l} + \prod_{q=1}^v x_q \frac{ЦБ}{(1+j)^m} = - \sum_{p=1}^v \left(\frac{C_p}{(1+j)^n} \prod_{q=1}^{p-1} x_q \right) + \frac{ЦБ}{(1+j)^m} \prod_{q=1}^v x_q,$$

где v — число этапов инновационного проекта; x_p , $p = 1, \dots, v$ — случайные параметры, имеющие распределения Бернулли: $x_p = \begin{cases} 1 & \text{с вероятностью } P_i; \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases}$

$l = \sum_{r=1}^{q-1} t_r$, $m = \sum_{r=1}^v t_r$, $n = \sum_{q=1}^{p-1} x_q$. Для простоты записи принято, что $t_0 = 0$. Остальные обозначения соответствуют ранее принятым.

Рассматриваемая модель построена с учетом особенности поэтапных инвестиций компании в инновационный проект. В конце каждого этапа менеджментом принимается решение о продолжении (прекращении) финансирования следующего этапа проекта. В конце заключительного этапа вследствие реализации факторов риска может быть не получена необходимая инвесторам ценность бизнеса. В этой связи первые слагаемые модели представляют собой дисконтированные инвестиционные затраты (их размер определяется успехом выполнения этапов проекта). Последнее слагаемое представляет собой дисконтированную ценность бизнеса инновационного проекта. Дисконтирование выполнялось по ставке 10 % за годовой период. Для оценки распределения ценности бизнеса проекта была применена рассмотренная методика. Основные учитываемые факторы риска на этапе производства и продаж инновационной продукции, по мнению менеджеров компании, состоят в объеме спроса на препарат и его цене.

Полученные на основе рассматриваемого метода результаты исследования с помощью программного инструментария Crystal Ball (выполнена серия из 10^4 испытаний) представлены в табл. 2.



Основные результирующие показатели оценки интегрированного риска портфеля, составленного из 30-ти инновационных проектов с низкой степенью взаимозависимости, представлены в третьем столбце таблицы. Видно, что с ростом числа инновационных проектов в портфеле наблюдается заметный рост показателя эффективности инвестиций (рост ожидаемого значения NPV более чем в 35 раз) при одновременном снижении риска инвестиций (снижение коэффициента ожидаемых потерь более чем в 1,5 раза, а вероятности реализации отрицательного значения NPV более чем в 7 раз). Однако этого может и не произойти, если портфель будет составлен из проектов с преобладанием эффектов каннибализма. Полученные на основе моделирования выводы подтверждаются действующей практикой фармацевтической компании. Например, компания постоянно инвестирует в портфель, составленный не менее чем из 30-ти инновационных проектов с низкой степенью каннибализации, тем самым существенно снижая уровень инновационного риска.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научная новизна данной работы заключается в разработке оригинального метода оценки интегрированного риска портфеля инновационных проектов промышленной компании, который учитывает не только риски отдельных проектов портфеля, но также различный характер взаимозависимости отдельных проектов. Полученная с помощью предлагаемого метода оценка интегрированного риска позволит промышленным компаниям внести необходимые коррективы в основные процессы управления портфелем проектов (формирование и балансировка портфеля проектов, анализ и мониторинг рисков, формирование программы управления рисками) в целях существенного повышения эффективности управления.

Метод может быть полезен в:

- формировании сбалансированного портфеля инновационных проектов с учетом его соответствия стратегическим целям компании и, в том числе, обеспечение необходимой балансировки между риском и доходностью инвестиций;

- управлении рисками проектов портфеля и, в том числе, построении эффективной системы управления рисками в компании;

- обеспечении необходимой прозрачности и привлекательности компании перед инвесторами, страховыми компаниями, приводящих к снижению стоимости привлекаемого финансирования, удешевлению страховых программ, повышению кредитных рейтингов и стоимости компании.

Дальнейшее совершенствование методологии оценки и управления интегрированным инновационным риском видится в развитии:

- методов, моделей и инструментов выявления и оценки источников синергии и каннибализма и, в том числе, атрибутивной модели оценки каннибализма;

- экономико-математических методов и моделей оценки и управления интегрированным риском портфеля проектов компании и, в том числе, решения проблемы формирования эффективной программы управления интегрированным риском;

- методологии принятия управленческих решений в условиях множественной неопределенности, эффектов взаимодействия проектов портфеля, а также дифференцированного отношения к риску лиц, принимающих решения;

- методологии селекции портфеля проектов компании в условиях неопределенности и эффектов взаимодействия, такое развитие, по-видимому, должно идти по пути построения стохастических оптимизационных моделей управления портфелем проектов.

Применение вычислительной техники для автоматизированного построения моделей денежных потоков и текущей стоимости инвестиций в портфель взаимозависимых проектов позволит существенно сократить расходы на построение самой модели в случае сильной взаимозависимости проектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Демкин И.В., Перцев Д.В. Метод оценки интегрированного риска портфеля инновационных проектов. Ч. 1. Анализ основных подходов к оценке риска портфеля проектов // Проблемы управления. — 2009. — № 3. — С. 54—60.
2. Демкин И.В., Стрельцов А.В., Галетов И.Д. Оценка риска инвестиционных проектов фармацевтического предприятия // Управление риском. — 2004. — № 4. — С. 16—27.
3. Демкин И.В. Управление инновационным риском на основе имитационного моделирования. Ч. 1. Основные подходы к оценке инновационного риска // Проблемы анализа риска. — 2005. — Т. 2, № 3. — С. 249—273.
4. Copeland T., Antikarov V. Real Options. A Practitioner's Guide. — N.-Y.: Thompson Texere, 2003. — 243 p.
5. Dickinson M., Thornton A., Graves S. Technology Portfolio Management: Optimizing Interdependent Projects Over Multiple Time Periods // IEEE Transactions on Engineering Management. — 2001. — Vol. 48, N 4.

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.Д. Цвиркуном.

Демкин Игорь Вячеславович — канд. экон. наук, доцент, МАТИ-РГТУ им. К.Э. Циолковского, г. Москва, ☎(499) 141-94-99, ✉I.Demkin@mail.ru,

Перцев Дмитрий Васильевич — финансовый аналитик, ООО «Дирол Кэдбери», г. Москва, ☎(495) 937-19-19, ✉Pertsev@mail.ru.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ДЕЙСТВИЯ РАСХОДОМЕРНЫХ КОНТУРОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ

А.Я. Андриенко, Г.П. Лосев, Е.И. Тропова

Изложены рекомендации по совершенствованию алгоритмов действия расходомерных контуров системы управления расходом топлива ракеты-носителя «Союз-2», обеспечивающему подавление остаточных проявлений автоколебательности в работе этих контуров.

Ключевые слова: автоколебания, расходомерный контур, система управления расходом топлива, ракета-носитель.

ВВЕДЕНИЕ

Представляемая статья лежит в русле цикла работ, начатых Н.М. Крыловым и Н.Н. Боголюбовым [1], продолженных Е.П. Поповым [2], затем М.В. Стариковой [3] и др. В ней демонстрируется одна из возможностей развития этих работ применительно к современному уровню технологии управления — конкретно, при использовании бортовой цифровой вычислительной машины (БЦВМ) в контуре управления ракеты-носителя (РН) «Союз-2».

На начальном этапе ввода в эксплуатацию РН «Союз-2» [4] — в частности, при исполнении [5] 8 ноября 2004 г. пуска № 1Л — проявились автоколебания в работе расходомерных контуров системы управления расходом топлива (СУРТ). И причиной тому стало, как ни странно, общее совершенствование системы управления (СУ) ракеты-носителя — с коренным обновлением элементной базы и введением в контур СУ бортовой цифровой вычислительной машины. Возникла необходимость в существенной доработке принципов и алгоритмов действия созданных более полувека назад расходомерных контуров СУ. В статье представлены результаты исследований, проведенных в обеспечение этой доработки.

1. КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ВОПРОСА

1.1. Необходимость создания — в составе СУРТ ракеты-носителя — контура регулирования соотношения расходов компонентов топлива (РСК) возникла в начале 1950-х гг. при разработке двухступенчатой РН «Спутник»¹ поскольку требовалось:

— парировать влияние быстро (и сильно) изменяющихся внешних факторов (давлений на входе в двигатели РН и температур компонентов топлива) на соотношение расходов компонентов топлива при низком быстродействии уровнемерного контура системы управления расходом топлива;

— организовать высокоточную отработку управляющего сигнала уровнемерного контура при существенном разбросе параметров нелинейных регулирующих органов (дресселей) и их приводов.

В качестве датчиков РСК применялись (и доныне применяются) расходомеры компонентов топлива («вертушечного» типа), измеряемая («регулируемая») координата РСК формировалась на основе радиочастотной техники — в виде разности частот f_o и f_r выходных сигналов расходомеров окислителя и горючего, а алгоритм действия РСК

¹ Эта РН — исходно прототипная (по первым двум ступеням) к РН «Союз-2».



определялся в классе релейных (с зоной нечувствительности) алгоритмов — в силу существенных ограничений мощности используемых на борту РН приводов (структурная схема контура РСК представлена на рис. 1).

1.2. Уже на начальном этапе стендовой отработки системы управления расходом топлива в 1955 г. проявились сильные автоколебания в работе расходомерного контура системы (с амплитудой до (3 ... 5) % $K_{\text{ном}}$, $K_{\text{ном}}$ — номинальное соотношение расходов компонентов топлива, и частотой ~0,3 — 0,5 Гц), поставившие под сомнение возможность выполнения заданных в ТЗ требований по точности поддержания соотношения расходов и конечному временному рассогласованию объемов компонентов топлива.

В последовавшем затем (в 1956—1957 гг.) цикле исследований причин возникновения этих автоколебаний и способов их подавления в качестве источника автоколебаний рассматривалась совокупность следующих факторов (в ракетном блоке):

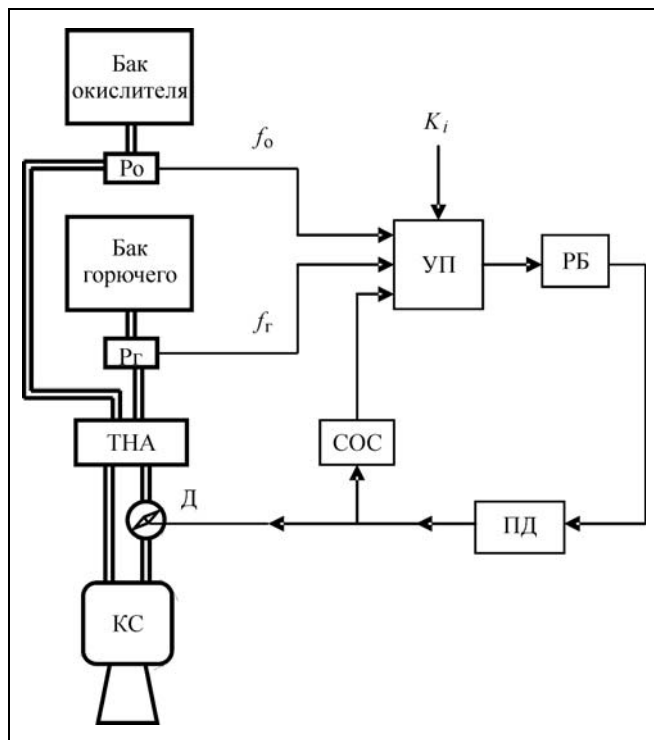


Рис. 1. Структурная схема контура регулирования соотношения расходов компонентов топлива:

P_o — расходомер окислителя; P_r — расходомер горючего; ТНА — турбонасосный агрегат; КС — камера сгорания; Д — регулируемый орган (дроссель); УП — усилитель-преобразователь; РБ — релейный блок; ПД — привод дросселя; СОС — скоростная обратная связь; f_o и f_r — выходные сигналы расходомеров окислителя горючего; K_i — уставочное значение (формируемое уровнем контуром СУРТ) соотношения расходов компонентов топлива

- инерционность отдельных звеньев ЖРД и питающих трубопроводов;
- инерционность расходомеров;
- инерционность и гистерезис привода дросселя;
- нелинейность гидравлической характеристики дросселя;
- люфт в сочленении привода с дросселем.

Выработанные в результате этих исследований рекомендации сводились к двум: повышению зоны нечувствительности (з. н.) РСК и введению так называемой «скоростной» обратной связи (СОС) с привода дросселя, реализуемой в виде релейной обратной связи (о. с.) с управляющего механизма привода.

Параметры з. н. и о. с. выбирались из условия, чтобы при работе на наиболее крутом участке характеристики дросселя автоколебания полностью подавлялись; при этом, однако, на более пологих участках характеристики дросселя возникает скользящий режим переменной частоты и скважности, тем более затянутый по времени отработки, чем на более пологом участке характеристики дросселя происходит регулирование.

Именно в такой реализации контур РСК эксплуатируется в составе РН «Спутник», «Восток», «Молния», «Союз» и «Союз-ФГ».

1.3. При разработке (на рубеже столетий) РН «Союз-2», предусматривающей перевод СУРТ на вычислительную базу БЦВМ (с большой длительностью T_0 цикла вычислений), произошла смена регулируемой координаты расходомерного контура СУРТ: в качестве таковой принято соотношение (с коэффициентами) чисел n_o и n_r импульсов², поступивших с расходомеров окислителя и горючего на скользящем интервале времени наблюдения; длительность $T_{\text{наб}}$ этого интервала была определена из условия удовлетворительного снижения влияния дискретности чисел n_o и n_r на процесс регулирования соотношения расходов компонентов топлива.

Применительно к условиям проведения пуска № 1Л параметры алгоритма РСК были приняты таким образом, чтобы по возможности воспроизводилось действие прототипного расходомерного контура СУРТ.

Однако при проведении первого летного испытания РН «Союз-2» (в пуске № 1Л) в работе РСК проявились автоколебания — практически на том же уровне, что и полвека назад (см. п. 1.2): сказалось действие (помимо факторов, упомянутых в

² Эти числа характеризуют объемы компонентов топлива, прошедших через двигатель за время $T_{\text{наб}}$.

п. 1.2) резкого возрастания запаздывания в измерениях регулируемой координаты РСК на скользящем интервале ($T_{\text{наб}} = 10T_0 = 0,6$ с) наблюдения. Поскольку сокращение длительности $T_{\text{наб}}$ приводит к заметному возрастанию влияния дискретности измерения n_o и n_r на точность РСК, значение $T_{\text{наб}}$ приходится сохранять в неизменности и изыскивать другие возможности подавления автоколебаний.

2. МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ ДЕЙСТВИЯ РАСХОДОМЕРНЫХ КОНТУРОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РАСХОДОВАНИЕМ ТОПЛИВА

Вполне эффективные возможности подавления автоколебаний в контуре РСК доставляют:

— поднастройка (в процессе управления расходом топлива) параметров РСК (главным образом, посредством управления зоной нечувствительности) из условия «срыва» возникающих автоколебаний;

— компенсация запаздываний в измерениях регулируемой координаты РСК посредством введения элементов прогнозирования будущего значения этой координаты (как это, по сути, делается в двучленном алгоритме действия СУРТ — см. работу [6], с. 68).

Далее излагается одна из «продвинутых» версий алгоритма действия РСК, в которой реализуются обе эти возможности и которая может рассматриваться как базовая для совершенствования расходомерных контуров бортовой системы управления расходом топлива.

В каждом j -м такте работы БЦВМ на участке полета I и II ступеней РН «Союз-2» последовательно вычисляются следующие координаты состояния алгоритма РСК ракетного бокового или центрального блоков.

1. Число импульсов, поступивших с расходомеров окислителя и горючего на скользящем интервале $[j - J, j]$ времени наблюдения, где $J = T_{\text{наб}}/T_0$ — проектная ширина этого интервала,

$$n_o(j) = n_r(j) = 0 \text{ при } j = 1, 2, \dots, J,$$

$$n_o(j) = \sum_{S=j-J}^j \Delta n_o(S), \quad n_r(j) = \sum_{S=j-J}^j \Delta n_r(S) \\ \text{при } j = J + 1, J + 2, \dots,$$

где $\Delta n_o(s)$, $\Delta n_r(s)$ — число импульсов, поступивших на s -м такте (длительностью $T_0 = 0,06$ с) работы БЦВМ; $j = 0$ — момент времени включения контура РСК в работу.

2. Измеренное среднеинтегральное на интервале $[j - J, j]$ значение соотношения объемных расходов компонентов топлива

$$K_V(j) = C \frac{n_o(j)}{n_r(j)},$$

где $C = C_o/C_r$; C_o и C_r , $\frac{\text{л/с}}{\text{Гц}}$ — тарифовочные значения цены импульсов расходомеров окислителя и горючего.

3. Текущее значение регулируемой координаты РСК — измеренное в j -й момент времени относительное отклонение среднеинтегрального соотношения $K_V(j)$ от его задаваемого равномерным контуром СУРТ значения K_{i-1} на интервале времени $(t_{i-1}, t_i]$:

$$\delta K_V(j) = \frac{K_V(j) - K_{i-1}}{K_{\text{ном}}} \text{ при } t_j = jT_0 \in (t_{i-1}, t_i],$$

где t_i — момент формирования равномерным контуром СУРТ уставки K_i на поддержание соотношения объемных расходов компонентов топлива (время t_i отсчитывается здесь от момента включения контура РСК в работу); $K_{\text{ном}}$ — номинальное значение соотношения объемных расходов компонентов топлива через двигатель ракетного блока.

4. Прогнозируемое значение регулируемой координаты

$$\delta K(j) = [B\delta K_V(j) - \delta K_V(j - J)]/(B - 1), \\ j = 2J + 1, 2J + 2, \dots,$$

где B — параметр алгоритма прогнозирования (аналог коэффициента «прицеливания» двучленного алгоритма [6]).

5. Текущие значения подстраиваемых параметров алгоритма РСК:

а) зоны нечувствительности

$$\delta K_{3.н}(j) = \begin{cases} \delta K_{3.н}(j-1) - \alpha \Delta \delta K(j) = \delta K_{3.н}^*(j), \\ \text{если } \delta K_{3.н}^*(j) \geq \delta K^*, \\ \delta K^* \text{ иначе,} \end{cases}$$

$$\text{где } \Delta \delta K(j) = \begin{cases} |\delta K_V(j)|, \text{ если } |\delta K_V(j)| \leq \Delta \delta K^*, \\ \Delta \delta K^* \text{ иначе;} \end{cases}$$

$\delta K_{3.н}(0) = \delta K_{3.н}$ — проектно-исходное значение зоны нечувствительности; α — коэффициент подстройки; $\delta K^* > 0$, $\Delta \delta K^* > 0$ — ограничительные параметры на выходе и входе блока формирования зоны нечувствительности РСК;



б) порогового значения регулируемой координаты, при превышении которого обеспечивается непрерывное вращение привода дросселя

$$\delta K_n(j) = \delta K_{3,n}(j) + \delta K_n,$$

где δK_n — ширина зоны импульсного режима работы РСК.

Замечание 1. Рациональные значения параметров алгоритма ($\delta K_{3,n}$, α , δK^* , $\Delta \delta K^*$, δK_n) определяются по результатам статистического моделирования работы контура РСК в составе СУРТ из условия обеспечения заданных требований по терминальной точности управления расходом топлива при минимизации статистически предельного отклонения (от номинала) соотношения расхода компонентов топлива. ♦

6. Управляющая команда (на включение или выключение привода дросселя), исполняемая на интервале времени $t \in (t_j, t_j + T_0)$:

$$u_j = \begin{cases} 0, & \text{если } |\delta K(j)| \leq \delta K_{3,n}(j), \\ -\text{sign} \delta K(j), & \text{если } |\delta K(j)| > \delta K_n(j), \\ -(1 - |u_{j-1}|) \text{sign} \delta K(j) & \text{иначе,} \end{cases}$$

где $u_j = 0$ — команда на останов привода дросселя, $u_j = 1$ — команда на вращение привода дросселя в сторону увеличения соотношения расходов компонентов топлива, $u_j = -1$ — команда на вращение привода дросселя в сторону уменьшения этого соотношения;

Замечание 2. При выполнении последнего из представленных в п. 6 условий реализуется импульсный режим работы РСК со скважностью 0,5 и частотой $1/2T_0$. ♦

7. Скорректированные значения подстраиваемых параметров алгоритма РСК

$$\begin{aligned} \delta K_{3,n}(j) &:= \\ &:= \begin{cases} \delta K_{3,n}, & \text{если } \chi_j = 0 \text{ или } \delta K_V(j-1) \delta K_V(j) < 0, \\ \delta K_{3,n}(j) & \text{иначе,} \end{cases} \\ \delta K_n(j) &= \delta K_{3,n}(j) + \delta K_n, \end{aligned}$$

где χ_j — команда, дополнительно формируемая равномерным контуром СУРТ ($\chi_j = 0$ в дискретных моментах времени прохождения задних фронтов временных рассогласований объемов компонентов топлива ракетного блока; $\chi_j = 1$ в остальных моментах времени).

3. ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ АЛГОРИТМА РЕГУЛИРОВАНИЯ СООТНОШЕНИЯ РАСХОДОВ КОМПОНЕНТОВ ТОПЛИВА

На основе представленного в § 2 описания модернизированного (базового) алгоритма действия РСК были составлены три версии рабочего алгоритма.

Версия 1 — почти такое же, как в пуске № 1Л, регулирование (по п. 1–3 алгоритма) соотношения расходов компонентов топлива, но с введением элементов поднастройки (п. 5, 6) параметров алгоритма действия РСК; однако прогнозирования регулируемой координаты не производится (в п. 4 полагается $\delta K(j) = \delta K_V(j)$).

Версия 2 — усовершенствование версии 1 посредством дополнительной корректировки поднастраиваемых параметров алгоритма РСК — с использованием операции п. 7.

Версия 3 — дальнейшее совершенствование алгоритма РСК в части замены текущего значения $\delta K_V(j)$ регулируемой координаты на её прогнозируемое значение $\delta K(j)$ — см. п. 4.

Точностные характеристики СУРТ, ожидаемые при реализации в составе СУРТ контуров РСК в версиях 1–3, оценивались посредством статистического моделирования (с шагом $\Delta T = T_0 = 0,06$ с) работы СУРТ: при этом действие контура РСК внутри интервала $(t_j, t_j + T_0)$ учитывалось на основе аналитического решения задач динамики расходов привода дросселя и ЖРД — решения, полученного с учетом неизменности управляющей команды РСК на этом интервале.

Замечание 3. Динамическая модель контура РСК представлялась эквивалентным апериодическим звеном с запаздыванием, гистерезисом и переменным коэффициентом усиления (определяемым крутизной гидравлической характеристики дросселя в текущем его угловом положении). Помимо высокочастотных (типа белого шума) составляющих расходомерного измерения, непосредственно определяемых дискретностью $\Delta n_0(s)$, $\Delta n_T(s)$, учитывалась низкочастотная (с периодом ~2 с) составляющая этих измерений, проявившаяся при лётных испытаниях и порождённая, по-ви-

Статистически предельное значение конечного временного рассогласования объемов окислителя и горючего РН «Союз-2»

Версия РСК	На ББ, с	На ЦБ, с
1	0,29	0,32
2	0,28	0,28
3	0,24	0,23

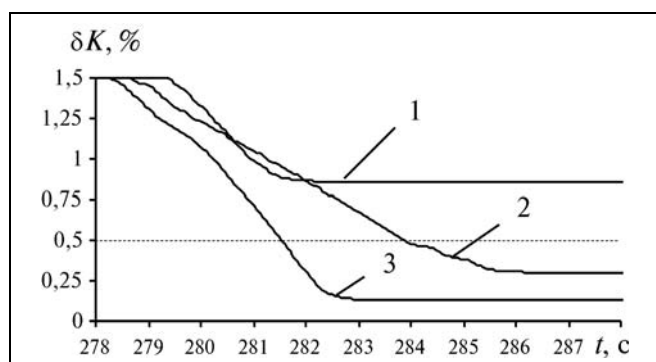


Рис. 2. Отработка управляющего сигнала уровня контура СУРТ центрального блока в конце полёта II ступени РН при минимальной скорости отработки этого сигнала с использованием контура РСК в версиях 1—3

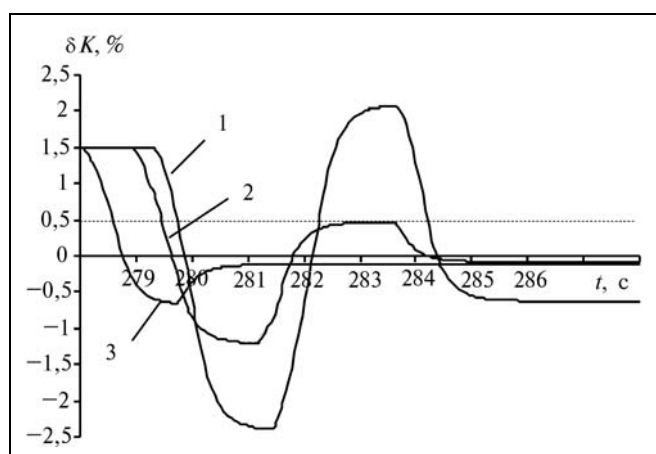


Рис. 3. Отработка управляющего сигнала уровня контура СУРТ центрального блока в конце полёта II ступени РН при максимальной скорости отработки этого сигнала с использованием контура РСК в версиях 1—3

димому, транспонированием (на скользящем интервале осреднения измерений) высокочастотных помех в низкочастотную область. ♦

В результате этого моделирования выявилось ухудшение точностных характеристик внутриблочного регулирования опорожнения баков РН «Союз-2», ожидаемых при реализации версии 1 алгоритма РСК, по сравнению с их проектными значениями — прежде всего, в части терминального управления опорожнением баков окислителя и горючего (см. таблицу, строка 1).

Ухудшение точностных характеристик СУРТ более заметно в центральном блоке (ЦБ); не вдаваясь в подробные разъяснения соответствующих причин, отметим лишь, что они обусловлены спецификой размещения дросселя системы опорожнения баков: на ЦБ — в магистрали окислителя, на боковом блоке (ББ) — магистрали горючего.

В целом же это ухудшение практически однозначно связывается с работой РСК:

а) при пониженной (в рамках допустимых по ТЗ условий) скорости изменения регулирующего воздействия (низкая скорость вращения выходного вала привода дросселя, зимние условия эксплуатации СУРТ на ЦБ либо летние на ББ);

б) при повышенной скорости этого изменения (высокая скорость привода дросселя, летние условия эксплуатации СУРТ на ЦБ либо зимние — на ББ).

Последние положения п. а) и б) истощающим образом иллюстрируются графиками 1 на рис. 2 и 3, где представлены результаты моделирования типовых режимов работы контура РСК центрального блока при отработке управляющего сигнала уровня контура СУРТ в конце полёта II ступени.

Основное влияние на точностные характеристики СУРТ оказывают два параметра процессов регулирования в контуре РСК: статическая ошибка отработки управляющего сигнала уровня контура СУРТ и динамическая ошибка (перерегулирование или даже автоколебания). Статическая ошибка приводит к ухудшению терминальной точности СУРТ (по конечному рассогласованию объемов компонентов топлива), динамическая — к

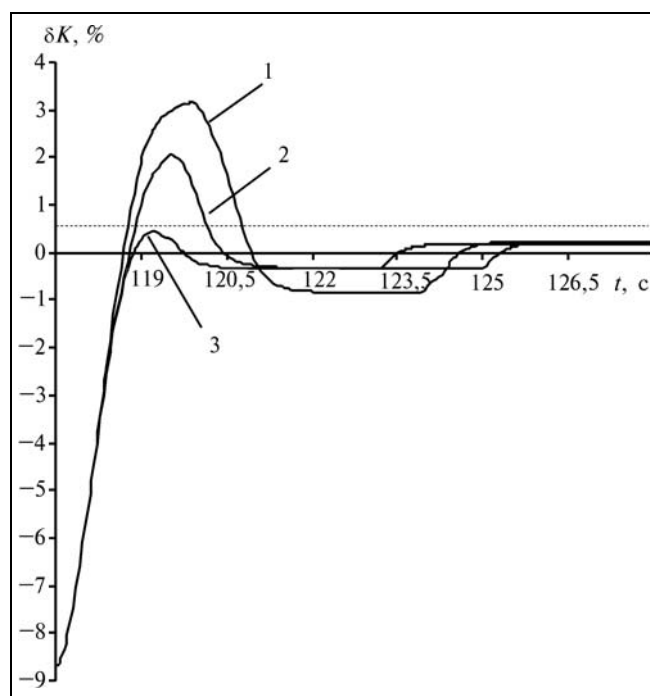


Рис. 4. Парирование возмущений, действующих на СУРТ центрального блока при разделении I и II ступеней при максимальной скорости парирования этих возмущений с использованием контура РСК в версиях 1—3

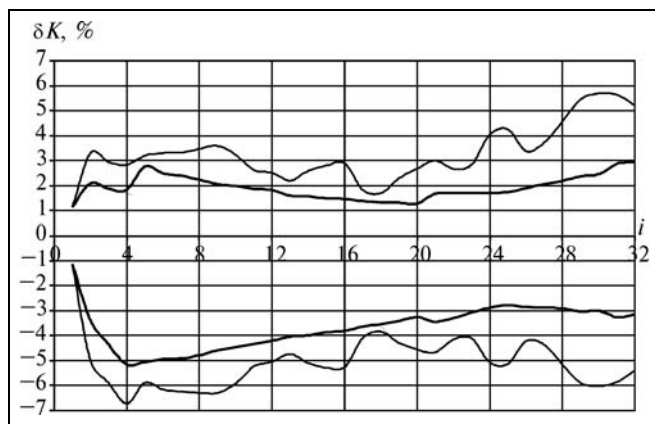


Рис. 5. Статистически предельные значения относительного отклонения (от номинала) соотношения расходов компонентов топлива в боковых блоках РН «Союз-2» (версия 1 контура РСК — тонкая линия, версия 3 — жирная линия)

увеличению отклонений (от номинала) соотношения расходов компонентов топлива. При парировании возмущений, действующих на СУРТ центрального блока в процессе разделения I и II ступеней (график 1 на рис. 4), реализуется максимальное значение динамической ошибки — в виде +3 %-го (по соотношению расходов) перерегулирования. Поэтому статистически предельное значение положительных отклонений соотношения объемных расходов компонентов топлива при разделении ступеней превышает (на ~0,5 %) допустимое значение.

Результаты моделирования работы контура РСК версии 2 представлены в виде графиков 2 на рис. 2—4. Демонстрируемое этими графиками в сопоставлении с графиками 1 заметное улучшение качества регулирования соотношения расходов компонентов топлива явилось залогом выполнения требований ТЗ, предъявляемых к точностным характеристикам СУРТ (см. вторую строку таблицы).

Поэтому данная версия исходного алгоритма РСК была рекомендована к реализации в СУРТ ракеты-носителя «Союз-2» в обеспечение проведения ближайших лётных испытаний.

Результаты моделирования работы контура РСК версии 3 представлены в виде графиков 3 на рис. 2—4. Качество регулирования, демонстрируемое этими графиками, приближается к предельно достижимому (см. последнюю строку таблицы).

Наиболее полные сведения об отклонениях (от номинала) соотношения K_V расходов компонентов топлива при работе контуров РСК в составе СУРТ доставляют данные, приведенные на рис. 5. На этом рисунке представлены графики изменения

(во времени t_i срабатывания i -х чувствительных элементов СУРТ, $i = 1, 2, \dots, 32$) статистически предельных значений отклонений от номинала соотношения K_V . Из графиков видно, что совершенствование РСК (при переходе от версии 1 к версии 3) приводит к полуторакратному сокращению диапазона отклонений соотношения расходов в процессе работы СУРТ ракеты-носителя «Союз-2».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований, представленных в статье, было принято решение в первоочередном порядке реализовать — к пускам № 2Л—5Л — версию 2 алгоритма действия контура регулирования соотношения расходов компонентов топлива. К настоящему времени эти пуски были успешно выполнены без замечаний к работе расходомерного контура системы управления расходом топлива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крылов Н.М., Боголюбов Н.Н. Введение в нелинейную механику. — Киев: Изд-во АН УССР, 1937.
2. Попов Е.Б. Учет влияния нелинейностей при расчете следящих систем // Автоматика и телемеханика. — 1953. — № 6. — С. 56—60.
3. Старикова М.В. Автоколебания и скользящий режим в системах автоматического регулирования. — М.: Машгиз, 1962. — 195с.
4. Козлов Д.И. Основные направления модернизации космических средств выведения среднего класса типа ракеты-носителя «Союз» // Космонавтика и ракетостроение. — 1999. — № 15. — С. 42—48.
5. Павельцев П. «Космос-2441», российский «Кейхоул»? // Новости космонавтики. — 2008. — Т. 18, № 9 (308). — С. 34—36.
6. Бортовые терминальные системы управления (принципы построения и элементы теории) / Б.Н. Петров, Ю.П. Портнов-Соколов, А.Я. Андриенко, В.П. Иванов. — М.: Машиностроение, 1983. — 200 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Б.В. Павловым.

Андриенко Анатолий Яковлевич — д-р техн. наук, зав. лабораторией, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ☎(495) 334-88-71, ✉vladguc@ipu.ru,

Лосев Герман Петрович — канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник, ФГУП «Научно-производственное объединение автоматики им. акад. Н.А. Семихатова», г. Екатеринбург, ☎(343) 350-90-48, ✉losev@npoa.ru,

Тропова Елена Ивановна — науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ☎(495) 334-88-71, ✉vladguc@ipu.rssi.ru.

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС «РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ» — СРЕДСТВО МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ

М.Х. Дорри, А.А. Роцин

Рассмотрены особенности и возможности разработанного инструментального программного комплекса. Показано, что он упрощает задачу разработки исследовательских стендов, которые применяются при проектировании систем управления сложных многоцелевых объектов для имитационного моделирования, разработки алгоритмов управления, синтеза подсистем и исследования взаимодействия подсистем в динамике.

Ключевые слова: программный комплекс, моделирование, алгоритмы управления.

ВВЕДЕНИЕ

В течение длительного времени авторы настоящей статьи занимались разработками в таких областях, как управление ядерными энергетическими установками, управление движением подводных аппаратов и кораблей, информационное обеспечение повышения эффективности управления системами жизнеобеспечения муниципальных образований.

При разработке систем управления постоянно ощущалась нехватка адекватного инструмента, помогающего проверить предлагаемые решения. Зачастую средства программирования в виде языков высокого уровня и имеющиеся программные продукты не могли полностью удовлетворить наши потребности. Процесс разработки систем управления затягивался на многие недели и месяцы.

По этой причине, наряду с решением конкретных задач управления, было создано несколько инструментальных программных систем. Некоторые из них: «Радиус» (расчет динамических управляющих систем), «Экспресс-Радиус» (усовершенствованный вариант) [1] были использованы в ряде научно-исследовательских институтов и на кафедрах вузов страны. В виде публикации они получи-

ли признание за рубежом в серии книг «Studies in automation and control» [2].

В статье дается описание основных свойств нового инструментального программного комплекса РДС (расчет динамических систем) [3, 4], разработанного в Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова. По нашему мнению, он может конкурировать со многими отечественными и зарубежными программными продуктами подобного типа.

Возможности программного комплекса иллюстрируются конкретными примерами. Примеры носят фрагментарный характер и преследуют цель обратить внимание на некоторые привлекательные черты комплекса РДС и подчеркнуть достаточно универсальный характер созданного программного продукта.

1. РАЗВИТИЕ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Первоначально в качестве программных средств исследования динамических процессов и разработки алгоритмов управления применялись универсальные алгоритмические языки программирования типа Algol, Fortran и др. Почти одновременно стали развиваться объектно-ориентированные и специализированные языки программи-



рования. Они были достаточно простыми, но, тем не менее, предоставляли целый ряд возможностей для исследователей и существенно упрощали их труд.

Бросая взгляд на развитие программных средств расчета динамических процессов, можно заметить, что универсальные средства программирования в виде языков и операционных систем, с одной стороны, и объектно-ориентированные комплексы, специализированные языки и программные продукты, с другой, — в своем развитии двигались навстречу друг другу, взаимно обогащая и дополняя свои возможности. Популярные универсальные языки программирования Basic, Fortran, Pascal, C++ и др., повинуясь велению времени, стали включать в свой состав средства визуализации и диалога. Их внешняя оболочка приобрела черты специализированных программных продуктов. В настоящее время такие среды разработки, как Visual Basic, Delphi-1,2,3, Visual C++, C++ Builder и т. п., гораздо лучше заключенного в них языкового ядра приспособлены к написанию сложных программных продуктов. В то же время, именно потребность упрощения программирования при решении задач моделирования и расчета динамических систем привели к необходимости совершенствования ориентированных средств программирования.

Можно ожидать, что в дальнейшем специализированные программные продукты еще в большей степени будут смыкаться с универсальными языками программирования и превращаться в крупные, интегрированные программные комплексы.

В настоящее время можно констатировать бурное развитие всех программных средств, предназначенных для научного и прикладного исследования организационных и технических объектов. Это развитие может в течение 10—20 лет в корне изменить представление о программировании. Оно все больше будет приобретать характер блочных конструкций или графовых моделей, в узлы которой будут включены процедуры решения более мелких задач, и будет определена логика взаимодействия блоков.

Этот процесс может стремительно видоизмениться под влиянием новых аппаратных средств, эффект от которых пока еще трудно оценить.

2. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА РДС

Разработку крупных систем управления удобно начинать с создания некоторого исследовательского стенда. Под исследовательским стендом будем подразумевать программно-алгоритмический комплекс, позволяющий создавать алгоритмы управления, рассчитывать, имитировать и отображать

происходящие в системах управления процессы с максимально возможным правдоподобием. Такие системы (их иногда называют виртуальными) как бы не существуют в действительности, а только благодаря работе компьютера предоставляют наглядную информацию о протекающих процессах. На исследовательских стендах возможно моделировать систему, менять модели объектов и создавать разные алгоритмы работы подсистем, не разрушая общую структуру исследовательского стенда. Основным мотивом создания комплекса РДС было построение удобных средств разработки такого рода стендов.

Инструментальный программный комплекс РДС вобрал в себя некоторые черты известных программных комплексов, которые можно разделить на следующие группы:

- программные комплексы для моделирования и синтеза систем управления (MATLAB, LabView и т. п.);

- системы диспетчеризации и архивирования данных. Это, так называемые, SCADA-системы (Supervisory Control And Data Acquisition);

- математические пакеты (Derive, MathCAD, Maple и т. п.);

- крупные системы автоматизации моделирования технологических процессов. Сюда относятся системы, создаваемые научными центрами по авиастроению, кораблестроению, энергетике и др., в основном, для собственных нужд и не предназначенные для коммерческого использования.

Рассмотрим особенности инструментального программного комплекса РДС. Программное обеспечение комплекса состоит из следующих основных частей (рис. 1).

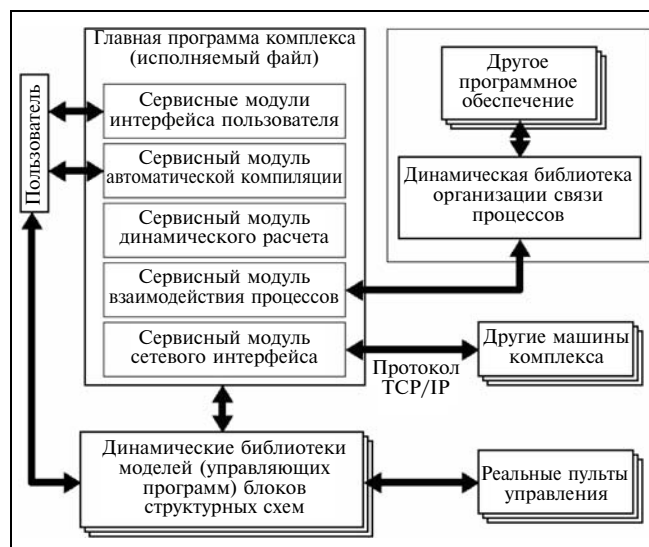


Рис. 1. Основные части программного обеспечения комплекса РДС

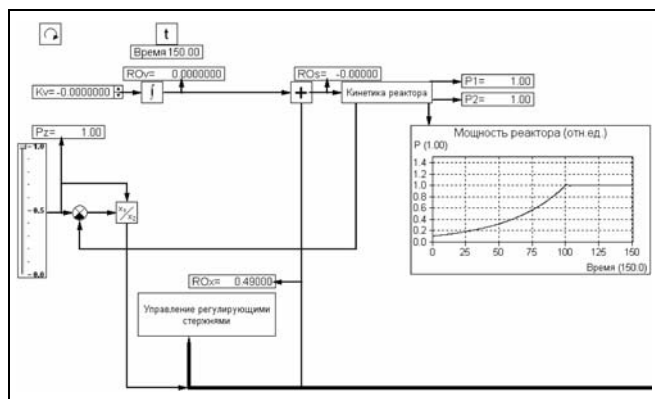


Рис. 2. Схема системы управления нейтронной мощностью ядерного реактора

- Главная программа комплекса — основной исполняемый модуль, обеспечивающий работу всего комплекса на каждой машине. В нее входит набор сервисных модулей, обеспечивающих взаимодействие различных частей комплекса между собой.
- Динамические библиотеки управляющих программ блоков РДС. Эти библиотеки обеспечивают функционирование блоков структурных схем. В них могут входить как стандартные математические модели, так и модели, созданные разработчиком самостоятельно при помощи модулей автоматической компиляции управляющих программ. Сами модули автоматической компиляции, а также программы, работающие с драйверами аппаратуры связи с объектом и систем сбора данных, тоже входят в эти библиотеки.
- Динамическая библиотека организации связи процессов, позволяющая комплексу взаимодействовать с программным обеспечением, созданным сторонними разработчиками.

В состав главной программы входят:

- модули интерфейса пользователя — самый обширный класс модулей главной программы, позволяющий разработчику создавать и редактировать схемы систем управления, наблюдать за моделируемыми процессами, задавать управляющие воздействия и др.;
- сервисный модуль автоматической компиляции — служит для взаимодействия собственно модулей автоматической компиляции, которые размещаются в динамических библиотеках вместе с моделями блоков и с главной программой комплекса;
- сервисный модуль динамического расчета — отвечает за моделирование в комплексе РДС;
- сервисный модуль взаимодействия процессов — работает вместе с библиотекой, описывающей связи, и входящей в состав комплекса;

— сервисный модуль сетевого интерфейса — служит для управления обменом данными между несколькими машинами.

Рассмотрим пример исследовательского стенда для разработки алгоритмов безопасного управления нейтронной мощностью малых ядерных реакторов на быстрых нейтронах. На рис. 2, 3 изображена схема системы и фрагменты подсистем исследовательского стенда. Уравнения кинетики реактора и функции формирования реактивности заложены в блоке «кинетика реактора» и подсистеме «управление регулирующими стержнями». Имеется задающее устройство, позволяющее менять уровень мощности реактора. На графике и индикаторах отображается динамический процесс изменения нейтронной мощности.

В подсистемах (см. рис. 3) изображены управляющие стержни, аварийные стержни защиты, пульт ручного управления. В процессе моделирования можно наблюдать за движением стержней в стационарных и аварийных режимах работы реактора. На панели отображаются значения реактивности, вносимой каждым из стержней, и их суммарная величина.

Схема системы управления нейтронной мощностью набирается средствами комплекса РДС. Отметим, что вся анимация сделана во встроенном векторном редакторе комплекса РДС, который достаточно прост в освоении: разработчик просто рисует картинку, изображающую тот или иной узел, а затем связывает ее координаты — значение, угол поворота, цвет или видимость на экране — с одной из координат системы. Возможность мультипликации позволяет наглядно увидеть протекающие процессы и приближает комплекс РДС к

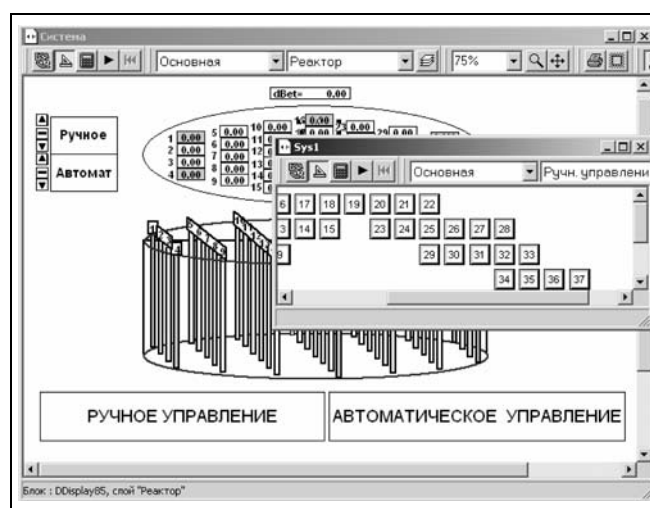


Рис. 3. Отображение работы стержней регулирования

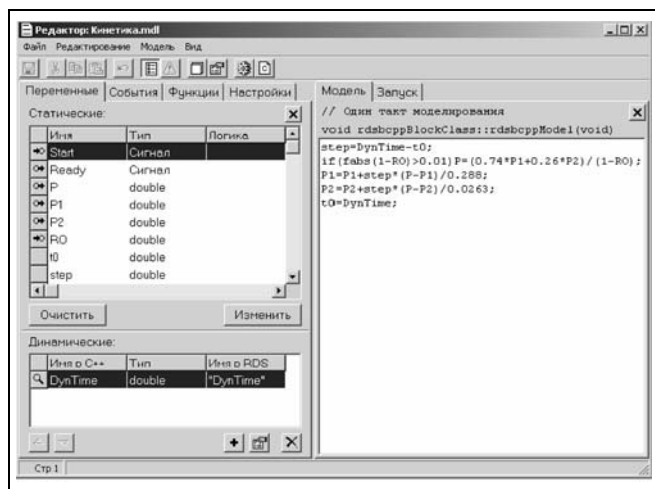


Рис. 4. Разностная модель кинетики ядерного реактора

SCADA-системам. Фактически можно говорить о виртуальных моделях управляемого объекта.

Для оптимизации параметров предусмотрены специальные блоки и интерфейс, позволяющий несколькими стандартными алгоритмами (перебор, покоординатный спуск и т. п.) находить оптимальные значения параметров управляющей системы.

Обратим внимание на простоту создания собственно блоков (рис. 4).

Кинетика ядерного реактора описывается двумя дифференциальными уравнениями.

$$P = (0,74P_1 + 0,26P_2)/(1 - RO), \text{ if } |1 - RO| > 0,01,$$

$$0,288 \frac{dP_1}{dt} + P_1 = P,$$

$$0,0263 \frac{dP_2}{dt} + P_2 = P,$$

где P — нейтронная мощность реактора в относительных единицах, P_1 и P_2 — мощности групп запаздывающих нейтронов, RO — реактивность.

Разностный вид модели при аппроксимации по Эйлера приведен на рис. 4, где step — шаг расчета. Модель написана в синтаксисе языка C++ и автоматически переводится в необходимый dll-файл и подключается к работе стенда. Это очень удобно, поскольку от исследователя не требуется высокой программистской квалификации. Важно лишь знание предмета и алгоритма расчета.

Важная черта комплекса РДС состоит в наличии видимых и невидимых слоев и их конфигураций. Размещение разных по назначению блоков и связей на разных слоях позволяет упорядочить схему и сделать ее легко читаемой, поскольку часть

схемы, с которой в данный момент не ведется работа, может быть «спрятана» на невидимых слоях.

Для осуществления связей между подсистемами широко используются шины, по которым передается комплексная информация о параметрах объекта и подсистем.

Инструментальный программный комплекс РДС успешно применялся также для разработки и других систем управления, в частности, стенда для исследования алгоритмов движения и стабилизации подводных лодок [4, 5].

Кроме средств моделирования непрерывных процессов, технологические процессы нуждаются в синтезе блоков логического управления, о которых речь пойдет далее.

4. ЛОГИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ

На рис. 5 приведен фрагмент конвейера в технологическом процессе [6]. Устройства 1 и 2 выполняют действия над деталями, а устройство 3 передвигает конвейер на 1 шаг. Имеются датчики положения устройств, в зависимости от состояния которых производятся действия. На графе операций, изображенном ниже, фишка после выполнения очередной операции переходит в следующую позицию. Логика работы легко переводится в программу, которую можно описать на языках высокого уровня. Программа блока, построенная по правилам перехода от графа операций к программе, состоит из ряда фрагментов, в которых первый оператор задает условие попадания фишки в позицию, а второй — условие выхода фишки из нее.

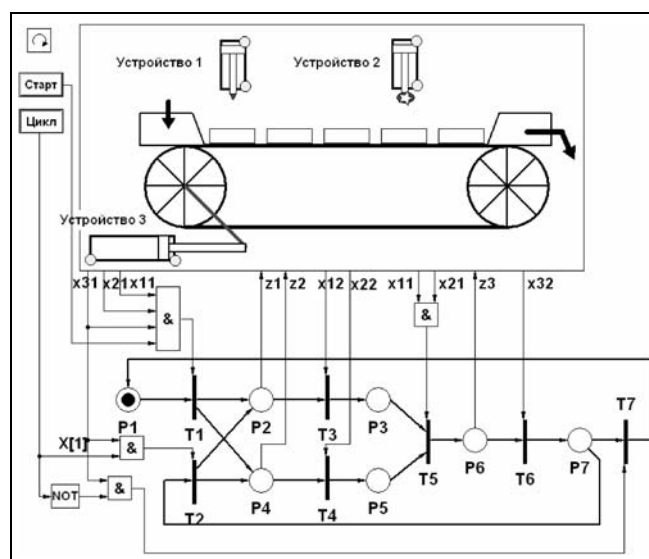


Рис. 5. Фрагмент конвейера в технологическом процессе

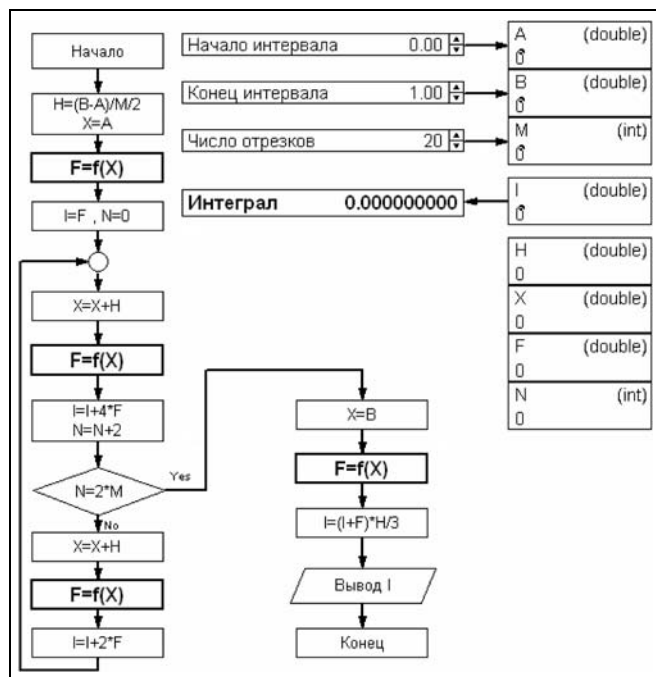


Рис. 6. Схема вычисления определенного интеграла

Блок с написанной программой непосредственно подключается к технологическому процессу и выполняет действия, предписанные графом операций.

Обратим внимание на одну из особенностей комплекса РДС — возможность задания нужной последовательности работы блоков. Любая схема, сама по себе, показывает только путь перетекания потока информации из блока в блок, но не дает информации о последовательности работы блоков. Очередность работы блоков не очень существенна в динамических процессах, где работа всех блоков происходит одновременно. Однако во многих задачах очень важна именно последовательность срабатывания блоков. В частности, такая ситуация встречается при рассмотрении алгоритмов решения вычислительных задач. В комплексе РДС заложена возможность моделирования алгоритмов, представляемых в виде схем. На рис. 6 приведена схема алгоритма вычисления определенного интеграла методом Симпсона [7].

В блоках $F = f(x)$ записывается вид исследуемой функции. На экране задаются начальные условия и выводятся результаты расчета. Задавать логику работы при рассмотрении схем алгоритмов удастся благодаря наличию в арсенале средств комплекса РДС специальной сигнальной переменной логического типа [4].

Перейдем к описанию других возможностей комплекса РДС. Следующий фрагмент показыва-

ет, каким образом комплекс РДС применялся для решения задач информационного обеспечения задач управления городом.

5. МНОГОРАЗМЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И ОТОБРАЖЕНИЕ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ КАРТ

С помощью комплекса РДС была составлена схема источников теплоснабжения Москвы: ТЭЦ, районные (РТС) и квартальные тепловые станции. Из этой схемы можно перейти к схеме соединения с ними потребителей (рис. 7). Пример интересен тем, что показывает, как на комплексе РДС создаются информационные системы, состоящие из нескольких тысяч объектов. При этом удастся связать объекты, представленные на схеме, с базой данных, хранящейся в СУБД Oracle, из которой можно черпать характеристики представленных объектов.

Для таких многомерных задач очень важно иметь возможность группового изменения характеристик, вида изображения и моделей группы блоков. Такая возможность заложена в программный комплекс РДС.

Рис. 7 демонстрирует еще одну, по нашему мнению, привлекательную черту программного комплекса РДС. Внутренний формат программного комплекса связывается с mif- и mid-форматами геоинформационных систем, таких как MapInfo. Это дает возможность переносить в РДС созданные в MapInfo карты и располагать объекты на карте местности. Тем самым достигается большая наглядность многих, связанных с городом, ситуаций. В приведенной на рис. 7 схеме выделены пути от источника к объекту. Автоматически рассчиты-



Рис. 7. Отображение карты местности и путей от источника тепла к объекту теплоснабжения одного из районов г. Москвы



ваются пути потоков при закрытии и открытии клапанов, отмечаются отключаемые тепловые пункты и дома.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итоги описанию программного комплекса, следует отметить, что в процессе построения РДС были выделены более 20-ти критериев, по которым можно сравнивать аналогичные системы. Их обсуждение было бы субъективным и выходит за рамки настоящей статьи. Пакет MATLAB по насыщенности первоклассными подпрограммами, решающими те или иные проблемы анализа и синтеза систем управления, без сомнения, превосходит все известные нам системы подобного типа. Комплекс LabView и SCADA-системы выигрывают у РДС по способам связи с реальными объектами. Имеются и другие преимущества. Однако, если рассматривать все критерии, то, по нашему мнению, РДС находится в множестве Парето, т. е. по некоторым критериям уступает, а по другим превосходит аналогичные программные продукты.

Представляется, что инструментальный программный комплекс РДС, помимо решения задач моделирования и разработки алгоритмов управления, будет весьма полезен при построении тренажеров и обучающих комплексов для операторов.

При построении стендов с помощью инструментального комплекса РДС достигается:

- сокращение сроков и стоимости разработки пультов операторов, тренажеров и исследовательских стендов в несколько раз;
- обеспечение возможности построения и модификации стендов без участия высококвалифицированных программистов.

К основным достоинствам РДС мы бы отнесли:

- возможность наглядного отображения процессов с использованием графиков, легкость создания мультипликации пользователем;
- создание автокомпилируемых блоков на синтаксисе языков высокого уровня;

- наличие видимых и невидимых слоев;
- удобные средства взаимодействия подсистем по шинам;
- групповое изменение характеристик блоков;
- возможность соединения нескольких компьютеров в общую сеть;
- возможность исследования процессов в разных временных масштабах и осуществления связи с реальным объектом.

Есть и другие интересные находки, которые можно оценить только в результате работы с инструментальным комплексом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дорри М.Х., Рошин А.А. Пакет «Экспресс-Радиус 2.1» для моделирования и исследования систем управления. — М.: Ин-т проблем управления РАН, 2000. — 97 с.
2. Jamshidi M., Herget C.J. Recent Advances in Computer-Aided Control Systems Engineering / Studies in Automation and Control. — Amsterdam — London — New York — Tokyo, 1992. — Vol. 9. — P. 417–429.
3. А.с. 2004611323 РФ. Расчет динамических систем (РДС) / М.Х. Дорри, А.А. Рошин. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 28 мая 2004 г.
4. Дорри М.Х., Рошин А.А. Инструментальная программно-алгоритмическая система для разработки исследовательских комплексов // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2008. — № 12. — С. 12–17.
5. Dorri M.Kh., Roshchin A.A. Multicomputer Research Desks for Simulation and Development of Control Systems // Preprints of the 17th IFAC World Congress, July 6–11, 2008, Seoul, Korea. — P. 15244–15249.
6. Юдицкий С.А., Белоусов О.О. Логическое управление роботизированными технологическими комплексами. — М.: Ин-т проблем управления РАН, 1986. — 68 с.
7. Дьяконов В.П. Справочник по алгоритмам и программам на языке Бейсик для персональных ЭВМ. — М.: Наука, 1987. — С. 104–107.

Статья представлена к публикации руководителем РРС О.В. Абрамовым.

Дорри Манучер Хабибуллаевич — д-р техн. наук, зав. лабораторией,

Рошин Александр Алексеевич — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник,

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ☎(495) 334-86-29, ✉dorrimax@ipu.ru.

Новые книги

Александров А.Г. Методы построения систем автоматического управления. — М.: Физматлит, 2008. — 232 с.

Бутковский А.Г. К философии кибернетики. — М.: ИПУ, 2009. — 27 с.

Горбатов В.А. Теория автоматов. — М.: АСТ; Астрель, 2008. — 559 с.

Гринин Л.Е. Макроэволюция в живой природе и обществе. — М.: URSS, 2008. — 247 с.

Митришкин Ю.В. Линейные модели управляемых динамических систем. Ч. 1. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. — 222 с.

Панасенко С.П. Алгоритмы шифрования. — СПб.: БХВ-Петербург, 2009. — 564 с.

Панкратов В.В. Специальные разделы современной теории автоматического управления. — Новосибирск: НГТУ, 2008. — 219 с.

Половко А.М. Основы теории надёжности. — СПб.: БХВ-Петербург, 2008. — 702 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗНАНИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ УНИКАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

О.А. Николайчук

Разработаны модели представления знаний и показано дальнейшее применение этих моделей для решения задач генезиса, прогнозирования и принятия решений при исследовании динамики технического состояния уникальных объектов. В результате комбинирования прецедентного, продукционного и математических методов получена гибридная модель представления знаний. На основе данного гибридного представления предложен алгоритм обработки знаний.

Ключевые слова: модели представления знаний, прецедент, продукция, обработка знаний, уникальная механическая система.

ВВЕДЕНИЕ

Возможность повышения эффективности использования знаний при решении исследовательских задач связана с развитием моделей представления и процессов извлечения, приобретения, формирования знаний. Данная статья посвящена совершенствованию моделей представления знаний в целях обеспечения возможности учета типа решаемой задачи и снижения, благодаря этому, времени на извлечение и обработку знаний в любой предметной области. Такие модели могут стать основой для дальнейшего развития интеллектуальных систем, в частности, систем накопления знаний и адаптивных компьютерных систем, функционирование которых не зависит от модели предметной области и др.

Модели представления знаний создаются на основе объектно-ориентированного подхода и прецедентного, продукционного и математического методов моделирования.

Объект, как основной элемент объектно-ориентированного подхода, моделирует часть окружающей действительности, что хорошо понимается экспертами, а затем реализуется посредством объектно-ориентированных программных средств. Понимание существа разрабатываемой модели позволяет экспертам принимать активное участие в моделировании предметной области, что значительно повышает качество и адекватность моде-

лей. Считается, что объектно-ориентированный подход дает наиболее эффективную возможность создавать программные системы, использующие знания, в условиях экспоненциального роста их сложности.

Прецедентный метод [1, 2] позволяет использовать опыт в некоторой предметной области, т. е. частное знание, которое было приобретено (оценено и сохранено) субъектом в процессе решения проблемы; зачастую его называют конкретным, фактическим знанием или фактом.

Продукционный метод [1] применяется для реализации рассуждений на основе модели, отражающей процессы, явления и события, происходящие на исследуемом объекте.

Математические модели представляют собой знание предметной области, представленное в виде аналитических зависимостей.

Сочетание перечисленных методов призвано компенсировать недостатки их отдельного применения [3]. Прецедентный метод позволяет получить правдоподобное решение без трудоемкого и тщательного анализа предметной области, но при наличии достаточного объема опытных данных, представленных в виде прецедентов. Продукционный метод позволяет получить достоверное решение и может быть задействован при отсутствии опытных данных, но требует наличия информации о зависимостях между предметными сущностями, процессами, явлениями, представленных в виде продукционных правил. Математический метод



обеспечивает получение точных решений при соответствующей формализации предметной области.

В данной статье предложены модели прецедентного и продукционного представления знаний, а также их гибридного представления совместно с математическими моделями, для решения задач генезиса, прогнозирования и принятия решений. Рассмотрены алгоритм гибридного метода, использующего данные представления, и пример, демонстрирующий его работу.

Примеры использования предложенных моделей основаны на знаниях, отражающих динамику технического состояния опасных уникальных объектов [4]. Подобные объекты изготавливаются в единичных экземплярах, подвергаются экстремальным воздействиям нагрузок и сред и представляют опасность для людей и окружающей среды. Такие объекты не могут быть испытаны в условиях, приближающихся к эксплуатационным, поэтому их надежность и безопасность обеспечиваются преимущественно посредством расчетно-экспериментальных и эвристических методов. К таким объектам относятся аппараты типа реакторов и колонн синтеза, котлы различного назначения, технологические трубопроводы, компрессоры и насосы высокого и сверхвысокого давления, применяемые в химической, нефтехимической и энергетической промышленности при давлениях и температурах, достигающих соответственно 320 МПа и 500 °С.

Моделирование знаний в данной предметной области необходимо для решения следующих исследовательских задач: определения причинно-следственного комплекса возникших (генезис) и возможных (прогнозирование) опасных ситуаций, идентификации, диагностирования и прогнозирования технического состояния объектов. Решение этих задач создает научную основу для управления техническим состоянием. Полное, на стадии создания, и своевременное, на стадии применения, определение и прогнозирование параметров технического состояния, обоснование и реализация методов выявления и интерпретации предвестников изменения технического состояния, а значит, устранение причин изменения технического состояния, позволит обосновать рациональную систему управления созданием и эксплуатацией уникальных объектов, а значит, реализовать необходимые мероприятия по обеспечению их безопасности. Отметим, что при исследовании уникальных объектов использование прецедентов, описывающих даже в некоторой степени отличающиеся события или состояния, что характерно для уникальных объектов, позволяет сократить число альтернатив для принятия решений.

Рассматриваемый подход можно применить и для оборудования массового производства, однако его эффективность требует доказательств, так как для таких объектов используются теории, базирующиеся на статистических данных и теории вероятности, что существенно снижает объемы используемых экспертных знаний.

1. ОБЩАЯ СТРУКТУРА МОДЕЛИ ЗНАНИЙ

Согласно классификации видов онтологий [5], предлагается моделирование знаний основывать на моделях как предметной (ПО), так и проблемной областей (ПрО) (рис. 1). В этом случае имеет место оптимизация (рационализация) соотношения представления и обработки информации, что обеспечивает их независимое развитие. Рассматриваемая предметная область представлена уникальными объектами (машины и аппараты) [3, 4, 6, 7], а проблемная область отражает задачи генезиса, прогнозирования и принятия решений.

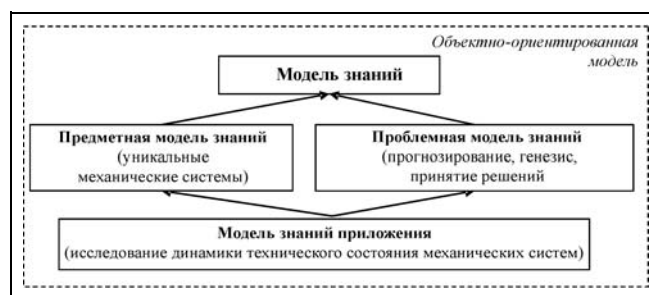


Рис. 1. Структура модели знаний

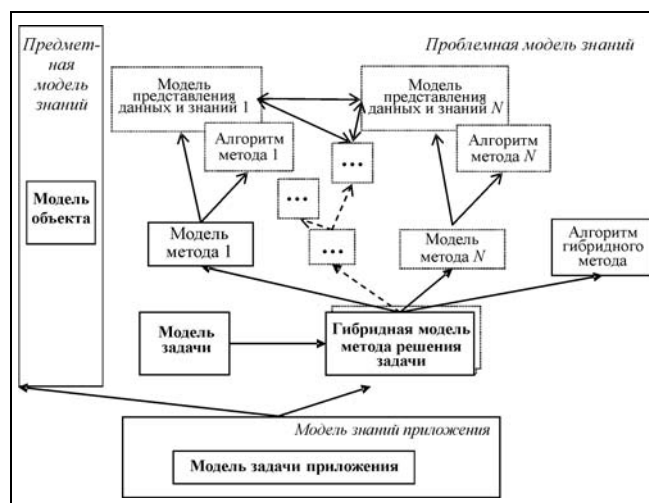


Рис. 2. Структура модели знаний, отражающая гибридность методов решения задач

Объектно-ориентированные модели предметной области включают в себя предметные сущности (классы и экземпляры классов) и отношения между ними. Модели проблемной области охватывают знания о способах решения разнообразных типов задач. При этом для эффективного решения каждой задачи требуется адекватное представление данных и знаний, а также алгоритмы, реализующие решение. Для обеспечения более полного использования и быстрого извлечения существующих знаний предлагается применять гибридный метод решения задач, который отражает сочетание различных методов решения, а, следовательно, различных типов моделей представления знаний (рис. 2).

Определим модели представления знаний для предметной и проблемной областей, а также для области приложения.

2. ПРЕДМЕТНАЯ МОДЕЛЬ ОБЪЕКТА

Объект предметной области представляем моделью:

$$\text{Объект} = (C_{V_1}, \dots, C_{V_N}), \quad (1)$$

где Объект — модель объекта; C_{V_j} — j -е свойство объекта исследования; свойства могут иметь различную объектно-ориентированную структуру, $j = \overline{1, N}$.

Далее, $C_{V_j} = \langle \text{имя, значение, область знаний} \rangle$, имя — наименование свойства, значение — значение свойства, область знаний — знания, которые позволяют определить значения свойства. Область знаний может включать в себя следующие данные и знания: принадлежащие пользователю (т. е. данные и знания вводятся пользователем); хранимые в базах данных (т. е. данные определяются в результате запроса к базе данных) и базах знаний (т. е. знания определяются в результате работы машины вывода на определенной базе знаний); имеющиеся в библиотеках математических моделей (т. е. данные получаются в результате вычислительных операций процедур (модулей)).

Подобное представление свойств объекта обеспечивает создание гибридной модели представления знаний, которая, в свою очередь, создает возможность использования гибридного метода решения задач предметной области.

3. ПРЕЦЕДЕНТНАЯ МОДЕЛЬ ЗНАНИЙ

Каждый прецедент включает в себя описание проблемы и ее решение, и обобщенная модель прецедента имеет следующий вид: $\Pi = \langle \text{Пр}, \text{Р} \rangle$,

где Π — прецедент; Пр — описание представленной в прецеденте проблемы; Р — описание решения (методы и средства) проблемы. Под проблемой понимается наличие неизвестных свойств объекта исследования и необходимость их определения по известным свойствам, т. е. $\text{Пр} = \langle \text{О}, \text{Ц} \rangle$, где О — объект исследования (1); Ц — цель разрешения проблемы.

Исходя из условий (требований, ограничений) конкретной предметной области, необходимо развить эту обобщенную модель до модели прецедента выбранной предметной и/или проблемной областей, и/или модели прецедента приложения (см. рис. 1).

3.1. Прецедентная модель знаний проблемной области

Рассмотрим, какие ограничения на модель прецедента налагает проблемная область. Прецедентный метод в нашем случае позволяет получить решение комбинированных задач: генезиса и принятия решений или прогнозирования и принятия решений, причем предметное наполнение решения будет определяться целью разрешения проблемы.

$$\begin{aligned} \text{Пр}^{\text{ПрО}} = & \langle \{O_{1k_1}\}_{k_1=1}^{N_1}, \dots, \{O_{nk_n}\}_{k_n=1}^{N_n}, \\ & \left\{ \text{Процесс}_p(C_{V_{j_1}}, \dots, C_{V_{j_{N_{\text{Процесс}}}}}) \right\}_{p=1}^P, \\ & \text{Ц}(\text{Оц}(C_{V_{\text{Ц},1}}, \dots, C_{V_{\text{Ц},N}})) \rangle, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\text{Пр}^{\text{ПрО}}$ — описание проблемы прецедента в аспекте проблемной области; $\{O_{ik_i}\}_{k_i=1}^{N_i}$ — i -й класс состояний объекта. Информация о состояниях объекта, как статическая, так и динамическая, позволяет отразить динамику состояния объекта. Предлагается осуществить классификацию состояний объекта для повышения эффективности метода поиска решения по аналогии. В ряде случаев это позволяет достигнуть значительного повышения производительности программной реализации метода благодаря понижению мощности пространства прецедентов. Выбор основания для классификации зависит от предметной области, и в зависимости от основания классификация может быть многоуровневой;

$O_{it}(C_{V_{i1}}, \dots, C_{V_{iN}})$ — состояние объекта i -го класса в t -й момент времени описывается набором свойств $C_{V_{i1}}, \dots, C_{V_{iN}}$, $t = \overline{0, T}$, $\sum_{i=1}^n N_i = T$;



$$\left\{ \text{Процесс}_p(\text{Св}_{j_1}, \dots, \text{Св}_{j_{N_{\text{Процесс}}}}) \right\}_{p=1}^P \quad \text{— класс}$$

процессов, протекающих на объекте, $N_{\text{Процесс}}$ — число свойств, определяющих процесс (процесс определяется некоторым набором свойств объекта). В данном классе необходимо описывать процессы, наиболее значимые для решения поставленных задач. Он необходим для применения методов частичной прецедентности решения и понижения неопределенности решения задач проблемной области.

Цель решения проблемы $\Pi(\text{О}_{\Pi}(\text{Св}_{\Pi,1}, \dots, \text{Св}_{\Pi,N}))$ определяется достижением некоторого «целевого» состояния объекта $\text{О}_{\Pi}(\text{Св}_{\Pi,1}, \dots, \text{Св}_{\Pi,N})$.

Структура прецедента, в частности, его часть, описывающая решение, должна учитывать специфику задач принятия решений. Принятие решений включает в себя формулирование и сопоставление альтернатив, выбор, построение и корректировку гипотезы, таким образом:

$$\mathbf{P}^{\text{ПрО}} = \langle \{ \mathbf{P}_{1k_1}, \mathbf{Kp}_{1s} \}_{k_1=1}^{M_1}, \dots, \{ \mathbf{P}_{sk_s}, \mathbf{Kp}_{s} \}_{k_s=1}^{M_s} \rangle, \\ \sum_{s=1}^S M_s = M,$$

где $\mathbf{P}^{\text{ПрО}}$ — модель решения, определяемая проблемной областью; $\{ \mathbf{P}_{sk_s}, \mathbf{Kp}_{s} \}_{k_s=1}^{M_s}$ — s -й класс решений по критерию $\mathbf{Kp}_s$; $\mathbf{P}_m$ — возможное решение поставленной проблемы в виде объектно-ориентированной структуры (набор альтернатив), $m = \overline{1, M}$. Выбор основания для классификации решений зависит от предметной области. При использовании вывода по аналогии возможно получение решения (альтернативы или альтернатив), не удовлетворяющего требованиям пользователя в соответствии с критерием оценивания. Наличие классов решений позволяет определить другие альтернативы, принадлежащие классу полученного решения, которые могут удовлетворить пользователя.

На основе структуры изучаемого объекта формируется разбиение полного пространства прецедентов на подпространства:

$$\Pi^{\text{ПО}} = \Pi^{\text{ПО}}(\text{О}) = \sum_{\text{Стр}} \Pi(\text{О}_{\text{Стр}}),$$

где $\Pi^{\text{ПО}}$ — пространство прецедентов предметной области; $\text{О}_{\text{Стр}}$ — подсистема или структурный элемент объекта; $\Pi(\text{О}_{\text{Стр}})$ — прецедент структурного элемента объекта.

3.2. Прецедентная модель знаний приложения

На основе предложенной модели прецедента далее рассмотрим компоненты модели прецедента приложения. Объектом предметной области исследования динамики технического состояния является механическая система (машины и аппараты), модель которой включает в себя такие свойства, как технические характеристики, технические требования, критерии предельного состояния, ремонтпригодность, мероприятия по обслуживанию и ремонту и др. Данные свойства образуют набор, посредством которого описывается статическое состояние объекта исследования.

Динамика технического состояния должна рассматриваться в течение всего «жизненного цикла» механической системы: от этапа проектирования до этапа утилизации. В связи с этим классификация состояний имеет два основания: в соответствии с этапами «жизненного цикла» — проектирование, изготовление, испытание, эксплуатация и утилизация и в соответствии со степенью опасности (или нежелательности) состояния на стадии эксплуатации: дефект, повреждение, разрушение, критический отказ.

С учетом предложенных ограничений проблемной (2) и предметной областей прецедент приложения «исследование динамики технического состояния уникальных механических систем» имеет вид, представленный коротежем:

$$\Pi^{\text{УМС}} = \langle \left\{ \text{МС}_{k_{\text{Пр}}}^{\text{Пр}} \right\}_{k_{\text{Пр}}=1}^{N_{\text{Пр}}}, \left\{ \text{МС}_{k_{\text{ИЗ}}}^{\text{ИЗ}} \right\}_{k_{\text{ИЗ}}=1}^{N_{\text{ИЗ}}}, \\ \left\{ \text{МС}_{k_{\text{Ис}}}^{\text{Ис}} \right\}_{k_{\text{Ис}}=1}^{N_{\text{Ис}}}, \left\{ \text{МС}_{k_{\text{Деф}}}^{\text{Деф}} \right\}_{k_{\text{Деф}}=1}^{N_{\text{Деф}}}, \\ \left\{ \text{МС}_{k_{\text{П}}}^{\text{Э}} \right\}_{k_{\text{П}}=1}^{N_{\text{П}}}, \left\{ \text{МС}_{k_{\text{Р}}}^{\text{Э}} \right\}_{k_{\text{Р}}=1}^{N_{\text{Р}}}, \left\{ \text{МС}_{k_{\text{От}}}^{\text{Э}} \right\}_{k_{\text{От}}=1}^{N_{\text{От}}}, \\ \left\{ \text{МС}_{k_{\text{Ут}}}^{\text{Ут}} \right\}_{k_{\text{Ут}}=1}^{N_{\text{Ут}}}, \{ \text{НП}_s \}_{s=1}^S, \Pi, \\ \{ \mathbf{P}_{\text{Пр}k_{\text{Пр}}}, \mathbf{Kp}_{\text{Пр}} \}_{k_{\text{Пр}}=1}^{M_{\text{Пр}}}, \dots, \{ \mathbf{P}_{\text{Ут}k_{\text{Ут}}}, \mathbf{Kp}_{\text{Ут}} \}_{k_{\text{Ут}}=1}^{M_{\text{Ут}}}, \rangle, \quad (3)$$

где $\Pi^{\text{УМС}}$ — прецедент уникальной механической системы; $\left\{ \text{МС}_{k_{\text{Пр}}}^{\text{Пр}} \right\}_{k_{\text{Пр}}=1}^{N_{\text{Пр}}}$ — класс состояний при проектировании; $\left\{ \text{МС}_{k_{\text{ИЗ}}}^{\text{ИЗ}} \right\}_{k_{\text{ИЗ}}=1}^{N_{\text{ИЗ}}}$ — класс состоя-

ний при изготовлении; $\left\{ MC_{k_{Ис}}^{Ис} \right\}_{k_{Ис}=1}^{N_{Ис}}$ — класс состояний при испытаниях; $\left\{ MC_{k_{Деф}}^{Э} \right\}_{k_{Деф}=1}^{N_{Деф}}$ — класс состояний дефекта при эксплуатации; $\left\{ MC_{k_{П}}^{Э} \right\}_{k_{П}=1}^{N_{П}}$ — класс состояний повреждений при эксплуатации; $\left\{ MC_{k_{Р}}^{Э} \right\}_{k_{Р}=1}^{N_{Р}}$ — класс состояний разрушений при эксплуатации; $\left\{ MC_{k_{От}}^{Э} \right\}_{k_{От}=1}^{N_{От}}$ — класс состояний отказа при эксплуатации; $\left\{ MC_{k_{Ут}}^{Ут} \right\}_{k_{Ут}=1}^{N_{Ут}}$ — класс состояний при утилизации; $\{ НП_s \}_{s=1}^S$ — нежелательные процессы, протекающие в процессе «жизненного цикла» механической системы, Ц — цель исследования (достижение состояния механической системы приемлемого уровня надежности); $\{ P_{Пр k_{Пр}}, K_{Пр} \}_{k_{Пр}=1}^{M_{Пр}}$ — класс решений на этапе проектирования; $\{ P_{Ут k_{Ут}}, K_{Ут} \}_{k_{Ут}=1}^{M_{Ут}}$ — класс решений на этапе утилизации. Классы решений представляют собой перечень мероприятий, осуществление которых позволяет достигнуть целевого состояния. Критериями выбора возможных решений служит уровень надежности, который они обеспечивают, и стоимость мероприятий.

Механическая система представляет собой иерархический объект. Иерархия имеет следующую структуру: «деталь — сборочная единица — специфицированное изделие». Данная структура учитывается в модели прецедента путем разбиения полного пространства прецедентов на подпространства:

$$\Pi^{ПО} = \Pi^{ПО}(O) = \sum_{i_{МС}} \sum_{i_{СЕ}} \sum_{i_{Д}} \Pi(O_{i_{МС} i_{СЕ} i_{Д}}),$$

где $i_{Д}$ — индекс деталей, $i_{СЕ}$ — индекс сборочных единиц, $i_{МС}$ — индекс специфицированных изделий.

Прецеденты, описанные в виде предложенной структуры, образуют базу прецедентов [7].

4. ПРОДУКЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЗНАНИЙ (РАССУЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ)

На обобщенном уровне модель знаний в виде продукции имеет вид:

если <условие> **то** <действие>.

4.1. Продукционная модель знаний проблемной области

Основываясь на модели предметной области и введенных в § 3 понятиях, уточняем вид продукции:

если $СВ_{j_1}, \dots, СВ_{j_{N_j}}$ **то** $СВ_{jj_1}, \dots, СВ_{jj_{N_j}}$,

где $СВ_{j_1}, \dots, СВ_{j_{N_j}}, СВ_{jj_1}, \dots, СВ_{jj_{N_j}}$ — некоторые наборы свойств.

Исходя из требований проблемной области, выделяем следующие виды продукции:

если $O_{it}(СВ_{i1}, \dots, СВ_{iN})$
то $O_{i(t+1)}(СВ_{(t+1)1}, \dots, СВ_{(t+1)N})$,
и(или)

если $СВ_{j_1}, \dots, СВ_{j_{N_j}}$ **или** $O_{it}(СВ_{i1}, \dots, СВ_{iN})$
то Процесс_p($СВ_{j_1}, \dots, СВ_{j_{N_{Процесс}}}$),
и(или)

если $O_{it}(СВ_{i1}, \dots, СВ_{iN})$ **то** P_m ,

где $O_{it}(СВ_{i1}, \dots, СВ_{iN})$, $O_{i(t+1)}(СВ_{(t+1)1}, \dots, СВ_{(t+1)N})$ — некоторые состояния объекта в моменты времени t и $t+1$; Процесс_p($СВ_{j_1}, \dots, СВ_{j_{N_{Процесс}}}$) — некоторый процесс, протекающий на объекте; P_m — некоторое решение, принятое исходя из цели поставленной задачи.

4.2. Продукционная модель знаний приложения

Используя результаты моделирования предметной области, в частности, предложенную классификацию технических состояний объекта исследования (по этапам жизненного цикла и по степени опасности на стадии эксплуатации), определим модели продукции уровня приложения «исследование динамики технического состояния уникальных механических систем»:

$R_{Пр}$: **если** MC_{tik_i} **то** $MC_{t+1i+1k_{i+1}}$,

где $R_{Пр}$ — имя класса продукции, описывающих причинно-следственные связи между состояниями

ми объекта; MC_{tik_i} — состояние объекта из i -го класса состояний в некоторый момент времени t ; $MC_{(t+1)(i+1)k_{i+1}}$ — состояние объекта из $(i+1)$ -го класса состояний в некоторый следующий момент времени $t+1$.

$R_{НП}$: если MC_{tik_i} то $НП_p$,

где $R_{НП}$ — имя класса продукций, описывающих нежелательные процессы; $НП_p$ — p -й нежелательный процесс.

$R_{НПР}$: если $MC_{t'ik_i}^{НС}$

то $\{P_{Прk_{Пр}}, Kp_{Пр}\}_{k_{Пр}=1}^{M_{Пр}}, \dots, \{P_{УТk_{УТ}}, Kp_{УТ}\}_{k_{УТ}=1}^{M_{УТ}}$,

где $R_{НПР}$ — имя класса продукций, описывающих решения; $MC_{t'ik_i}^{НС}$ — нежелательное состояние в некоторый момент t' в прошлом, являющееся причиной возникновения некоторого текущего состояния.

Классы продукций с учетом введенной классификации образуют базы знаний [7].

Моделирование опыта невозможно без использования математических моделей процессов, явлений и событий. Тип математической модели определяется требованиями проблемной области, ее идентификация осуществляется на основе предметной области, а принятие конкретного решения возможно только в рамках приложения.

В случае решения задачи исследования динамики технического состояния математический аппарат может быть использован для определения значений отдельных свойств при описании объекта исследования, включая его статическое и динамическое состояние. Например, при описании скорости развивающихся макротрещин, изменения твердости материала, изменения остаточных напряжений в детали и др.

5. ГИБРИДНАЯ МОДЕЛЬ ЗНАНИЙ И МЕТОД ЕЕ ОБРАБОТКИ

Гибридное моделирование знаний основано на прецедентных, продукционных и математических моделях представления знаний. Порядок и способы сочетания моделей определяются исходя из особенностей предметной и проблемной областей. В частности, на основе математических моделей могут быть определены значения свойств, составляющих как элементы прецедентной, так и продукционной моделей, в свою очередь продукционные модели могут быть использованы для оп-

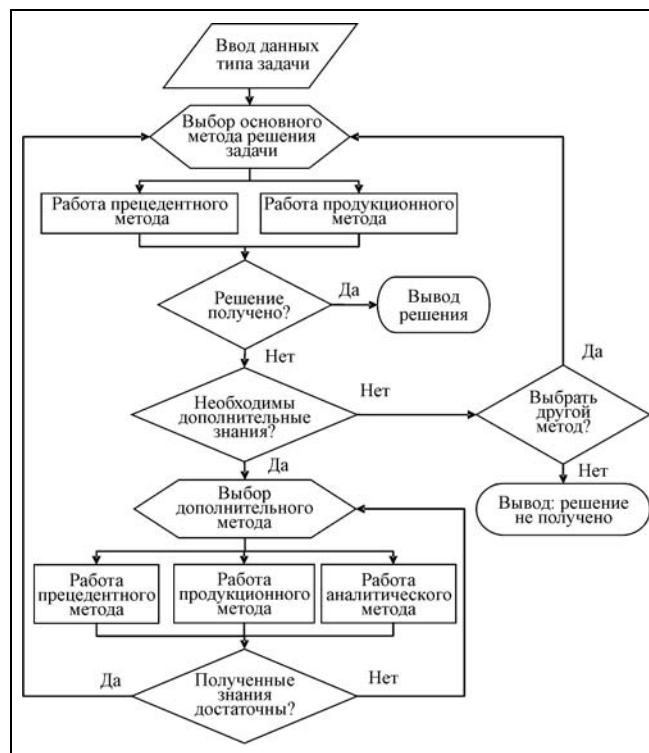


Рис. 3. Алгоритм взаимодействия методов

ределения значений свойств или при адаптации решений, полученных по аналогии:

$$M3 = \langle P, \text{Продукция}, M, F_{ПМ}, F_{\text{Продукция}M}, F_{\text{Продукция}P} \rangle,$$

где $M3$ — модель знаний, P — прецедентная модель, Продукция — продукционная модель, M — математическая модель, $F_{ПМ}: P \rightarrow M$ — множество отношений между прецедентами и математическими моделями, $F_{\text{Продукция}M}: \text{Продукция} \rightarrow M$ — множество отношений между продукциями и математическими моделями, $F_{\text{Продукция}P}: P \rightarrow \text{Продукция}$ — множество отношений между прецедентами и продукциями.

Отношения $F_{ПМ}, F_{\text{Продукция}M}, F_{\text{Продукция}P}$ обеспечиваются на основе информации, содержащейся в описании свойств объекта предметной области (1).

Гибридный алгоритм взаимодействия рассматриваемых методов приведен на рис. 3.

Для описания взаимодействия методов введены понятия «основного метода» и «дополнительного метода». Под основным методом понимается метод, с помощью которого может быть получено решение поставленной задачи. Дополнительный метод — это метод, который применяется для получения дополнительных данных и знаний, необ-

ходимых для решения поставленной задачи. Сначала выбирается основной метод решения задачи и на основе входных данных осуществляется работа данного метода, в результате которой решение может быть получено или не получено. В последнем случае либо получают дополнительные знания с помощью дополнительных методов для повторного применения выбранного метода, либо выбирают другой метод решения задачи.

6. ПРИМЕР

Рассмотрим взаимодействие моделей для решения задачи прогнозирования состояния уникальной механической системы. Объектом исследования является подводящий технологический трубопровод под колонной синтеза аммиака. Выделим основные свойства объекта, на основе которых решается задача, т. е. элементы множества, описывающие исходное состояние объекта $MC_0(S_{v_{01}}, \dots, S_{v_{0N}})$:

- свойства объекта исследования: объект изготовлен из углеродистой стали ($S_{v_{01}}$); имеются сварные монтажные швы ($S_{v_{02}}$); обеспечивается герметичность элементов ($S_{v_{03}}$); трубопровод предназначен для транспортировки пожаровзрывоопасной рабочей среды ($S_{v_{04}}$) и др.;
- воздействующие факторы: высокое внутреннее давление; высокая температура ($S_{v_{05}}$); вибрация ($S_{v_{06}}$) и др.;
- свойства системы прочностной надежности: запасы прочности ($S_{v_{07}}$); запасы ресурса ($S_{v_{08}}$); периодическое диагностирование ($S_{v_{09}}$) и др.

Для примера опишем только первый класс состояний — класс дефектности и последний класс состояний — класс отказов (в дальнейшем заменим индексы в выражении (3): Деф на 1, От на 4).

- Класс дефектности $\left\{ MC_{1k_1}^{\Theta} \right\}_{k_1=1}^{N_1}$. Состояние

$MC_{1k_1}^{\Theta}(\dots, S_{v_{k_12}}, \dots, S_{v_{k_1sd}}, \dots)$, принадлежащее этому классу, описывается объектными свойствами, например: $S_{v_{k_12}}(S_{v_{k_121}} \leq 3 \text{ мм}, \dots)$ — свойство, описывающее сварные монтажные швы, где $S_{v_{k_121}}$ — допускаемая высота валика шва; $S_{v_{k_1sd}}(S_{v_{k_1sd1}} \leq 5 \text{ мм}^2, S_{v_{k_1sd2}} \leq 2 \text{ мм}^2, \dots)$ — свойство, описывающее дефект сварки, где $S_{v_{k_1sd1}}$ — допускаемая эквивалентная площадь дефекта, $S_{v_{k_1sd2}}$ — допускаемая длина дефекта.

- Класс отказов, $\left\{ MC_{4k_4}^{\Theta} \right\}_{k_4=1}^{N_4}$. Состояние

$MC_{4k_4}^{\Theta}(\dots, S_{v_{k_4so}}, \dots)$, принадлежащее этому классу, описывается свойствами, например: $S_{v_{k_4so}}(S_{v_{k_4so1}} \leq 1 \text{ л/ч}, \dots)$ — свойство, описывающее параметры разгерметизации неразъемных соединений, где $S_{v_{k_4so1}}$ характеризует допустимость разгерметизации неразъемных соединений не более 1 л/ч.

Среди деградиационных процессов, происходящих на объекте, можно выделить следующие: $НП_1$ — многоцикловая усталость; $НП_2$ — коррозионное растрескивание.

Цель Ц исследования заключается в достижении состоянием механической системы приемлемого уровня прочностной надежности и безопасности, т. е. «целевого» состояния $O_{\Pi}(\dots, S_{v_{\Pi7}}, \dots)$, где свойство $S_{v_{\Pi7}}(S_{v_{\Pi71}} = 25 \text{ МПа}, \dots)$ описывает циклическую прочность при многоцикловых нагрузках, $S_{v_{\Pi71}}$ — предел выносливости при симметричном цикле нагружения.

На стадии проектирования рассмотрим ситуацию, когда на объекте, на стадии изготовления, может быть пропущен недопустимый дефект сварки: площадь дефекта $S_{v_{k_1sd1}} \geq 5 \text{ мм}^2$ и длина дефекта $S_{v_{k_1sd2}} \geq 2 \text{ мм}$. Необходимо решить задачу прогнозирования состояния объекта с таким дефектом при воздействии вибрации.

Допустим, в качестве основного метода выбран прецедентный метод. Информация, описывающая свойства исходного состояния, может быть получена в результате ввода данных пользователем или из базы данных. Тогда алгоритм решения задачи состоит в следующем.

Шаг 1. На основе известных свойств объекта определяется множество состояний объекта, т. е. состояний, где обнаружен подобный недопустимый дефект и имеет место какой-то деградиационный процесс. На основе анализа близости аналогов (подобных состояний) определяется вид деградиационного (нежелательного) процесса, протекающего на исследуемом объекте. В нашем случае определен деградиационный процесс: $НП_1$ (имя $НП$, ... $S_{v_{j_{НП}}}, S_{v_{(j+1)_{НП}}}, \dots)$, где имя $НП$ — имя деградиационного процесса, многоцикловая усталость; $S_{v_{j_{НП}}}(S_{v_{j_{НП1}}}, \dots, S_{v_{j_{НПN_{НП}}}})$ — свойство, описывающее кинетику деградиационного процесса (совокупность событий, описывающих опасные про-



цессы и явления); $св_{j_{нп}пр}$ (имя события, содержание события, $БЗ_{дп}$) — свойство, описывающее событие, $пр = \overline{1, N_{нп}}$, $БЗ_{дп}$ — база знаний деградационных процессов, на основе которой можно получить знания о кинетике этого процесса; $Св_{(j+1)_{нп}}$ — свойство, описывающее признаки деградационного процесса; $св_{(j+1)_{нп}пр}$ (имя признака, содержание признака, $БЗ_{дп}$) — свойство, описывающее признак.

В случае, если в аналогах отсутствует информация о некоторых свойствах деградационного процесса, необходимо их определить для получения более точного решения задачи. Предполагаем, что признаки в нашем примере неизвестны.

Шаг 2. На основе известных свойств объекта и вида деградационного процесса определяются признаки деградационного процесса с помощью продукционного метода и базы знаний $БЗ_{дп}$. В частности, при многоциклового усталости зарождаются и развиваются трещины, опасность которых характеризуется величиной K_I . Поэтому среди применяемых правил используется следующее:

если $Св_{j_{нп}}$ ((Коэффициент интенсивности напряжений K_I ; значение неизвестно; Процедура K_I) $\geq$ (Вязкость разрушения материала в вершине макротрещины, K_{IC} ; значение неизвестно; $БД_M$), ...) **то** $Св_{(j+1)_{нп}}$ (Разрушение (вид — «хрупкое», ...), ...).

Для соблюдения этого правила необходимо вычислить с помощью процедуры Процедура K_I значение переменной K_I и выполнить запрос к базе данных материалов $БД_M$ для определения значения K_{IC} .

Шаг 3. Значения переменной K_I определяется с помощью математического метода и возвращается продукционному методу.

Шаг 4. Далее, с помощью выбранного продукционного правила определяются признаки деградационного процесса (Разрушение (вид — «хрупкое», ...)). Результаты передаются в прецедентный метод.

Шаг 5. На основе полученной информации о значениях свойств описывающих деградационный процесс решается задача прогнозирования состояния с помощью прецедентного метода.

В результате взаимодействия методов получаем решение — прогнозируемые варианты динамики технического состояния трубопровода:

— хрупкое разрушение с фактором уверенности 0,9;

— дальнейший рост сквозной трещины с фактором уверенности 0,1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные модели и алгоритмы сочетают преимущества различных подходов. Они позволяют развить свойства интеллектуальных систем, обеспечивающих возможности поддержки процесса извлечения знаний экспертом, создать автоматизированный метод приобретения и формирования релевантной модели знаний и эффективные алгоритмы обработки знаний.

Результаты моделирования знаний были использованы для реализации информационно-логико-математической модели в системе имитационного моделирования технического состояния уникальных машин и аппаратов [6], а также в интеллектуальных программных системах для определения причин отказов и аварий [3, 7].

ЛИТЕРАТУРА

1. Льюгер Джордж Ф. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем. — М.: Вильямс, 2003.
2. Aamodt A., Plaza E. Case-Based reasoning: Foundational issues, methodological variations, and system approaches // AI Communications. — 1994. — Vol. 7, N 1. — P. 39—59.
3. Николайчук О.А., Юрин А.Ю. Прототип интеллектуальной системы для исследования технического состояния механических систем // Искусственный интеллект. — 2006. — № 4. — С. 459—468.
4. Берман А.Ф. Деградация механических систем. — Новосибирск: Наука, 1998. — 320 с.
5. Handbook on Ontologies / Staab Steffen eds. — Heidelberg: Springer — Verlag, 2004.
6. Берман А.Ф., Николайчук О.А. Пространство технических состояний уникальных механических систем // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2007. — № 1. — С. 14—22.
7. 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.

Статья представлена к публикации членом редколлегии С.Н. Васильевым.

Николайчук Ольга Анатольевна — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, Институт динамики систем и теории управления СО РАН, г. Иркутск, ☎(3952) 45-31-52, ✉nikoly@icc.ru.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА СИСТЕМ РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧИ

А.А. Саакян

Рассмотрена проблема выбора показателей качества, характеризующих эффективность системы распознавания звуковой речи. Сформулированы требования к показателям качества и предложена методика их экспериментального исследования. Дан анализ свойств известных показателей качества, приведены результаты эксперимента, позволяющие выбрать наилучший из них.

Ключевые слова: распознавание речи, алгоритм распознавания, показатель качества, измерение качества.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования в области машинного распознавания речи ведутся в настоящее время исключительно эвристическими методами по причине отсутствия полных моделей как речевого сигнала, так и процесса рчеобразования. Подобные модели, существуй они, позволили бы аналитически решать задачу конструирования алгоритма распознавания с заданными характеристиками точности, надежности, дикторозависимости.

Альтернативой использованию полной модели речевого сигнала служит выдвижение гипотез о свойствах алгоритма распознавания, конструирование алгоритма согласно этим гипотезам и практическая проверка его эффективности. Существующие хорошо изученные модели отдельных аспектов и этапов процессов образования и восприятия речи человеком помогают сделать поиск гипотез направленным. В частности, знание анатомии голосового аппарата позволяет объяснить эффект коартикуляции — взаимного влияния соседствующих в речевом сигнале звуков. Хорошо изученная связь объективных физических характеристик звуковой волны с субъективными ощущениями, возникающими в ухе при ее восприятии, позволяет при машинной обработке речи описывать речевой сигнал с помощью этих моделей. При синтезе алгоритмов распознавания применяется также модель частотного разложения звуковой волны во внутреннем ухе.

Упомянутые модели имеют статус эвристик, поскольку, будучи отрывочными, они не объясняют всех свойств речевого сигнала, и при конструировании алгоритма извлечения из речевого потока определенной информации приходится привлекать дополнительные модели, обычно сто-

хастические, требующие обучения. Характеристики синтезированного таким комбинированным способом алгоритма распознавания могут быть вычислены исключительно эмпирически с использованием тестовой выборки речевых записей. В связи с этим важен оптимальный выбор показателей качества системы распознавания (СР) речи, характеризующих заданные ее свойства и позволяющих сравнивать эффективность разных алгоритмов и оптимизировать их параметры. Синтез показателя качества (ПК) с требуемыми свойствами опять-таки затруднителен. Однако можно сформулировать требования к ПК, позволяющие из имеющегося их набора экспериментально выбрать наилучший. На решение этой задачи и нацелено настоящее исследование.

1. ТРЕБОВАНИЯ К ПОКАЗАТЕЛЮ КАЧЕСТВА

Показатель качества системы распознавания является вещественной функцией вида $Q(\vec{l}, T)$, где $\vec{l}$ — вектор параметров системы, T — тестовое множество, случайная выборка из совокупности S всевозможных речевых записей, включающей в себя всевозможные варианты произнесения всевозможных последовательностей слов. Вид и состав параметров $\vec{l}$, разумеется, различен для разных СР. Впрочем, большинство современных систем, ориентированных на преобразование звуковой речи в цепочку слов, имеет единообразную структуру и характеризуется сходным набором параметров: речевой сигнал моделируется как последовательность отдельных звуков (фонем), образующих конечный алфавит. Отдельные фонемы моделируются при помощи скрытых марковских моделей (СММ) [1, 2]. Параметры моделей вычисляются с использованием обучающей выборки. Алгоритм



обучения итеративный и обеспечивает достижение локального оптимума (на обучающей выборке) за конечное число итераций.

Однако на тестовой выборке, вследствие явления переобучения (сверхобучения), эффективность системы должна поначалу возрасти, достичь максимума, а затем начать уменьшаться. Таким образом, число итераций обучения является оптимизируемым параметром системы. Далее, перед началом практического применения СР может, при наличии такой возможности, быть адаптирована к особенностям голоса конкретного пользователя, что повышает точность распознавания. Прирост эффективности системы при адаптации зависит от количества адаптационного речевого материала, которое заранее (на этапе проектирования системы) неизвестно. Таким образом, количество адаптационного речевого материала также является параметром системы, определяющим ее эффективность.

Для измерения значения ПК $Q(\vec{l}, T)$ необходимо, задав исследуемой СР значения параметров $\vec{l}$, распознать с ее помощью тестовую выборку T и в результате получить, в зависимости от назначения системы, последовательность слов или отдельных звуков. Для тестовой выборки задана корректная транскрипция. Значение ПК вычисляется как степень близости распознанной последовательности к корректной. При исследовании свойств СР стремятся максимально разграничить действие разных факторов на результат работы, поэтому модель языка обычно выбирается максимально простой: цепочка элементов языка (слов или фонем) произвольной длины. Порядок элементов произвольный, априорная вероятность появления одинакова для всех элементов. Алфавит элементов в случае фонемной грамматики языка задан и меняется, разумеется, не может. При распознавании целых слов словарь языка формируется из всех слов, встречающихся в тестовой выборке, и дополняется до заданного размера случайно выбранными словами. Эффективность системы падает с увеличением числа допускаемых слов, поэтому объем словаря языка также является параметром системы.

Рассмотрим требования к показателю качества.

- Пусть параметры $\vec{l}$ фиксированы, тогда $Q(\vec{l}, T)$ является функцией $Q_l(T)$ от случайного множества T : измеренное значение ПК зависит от случайной тестовой выборки. Для оценивания математического ожидания значения ПК и сравнения двух значений нужно применять статистические методы вычисления доверительных интервалов и проверки гипотез. При заданном уровне значимости доверительный интервал имеет тем меньшую (относительную) длину, чем меньшим рассеянием характеризуется случайная величина $Q_l(T)$. Очевидно, из двух ПК лучший из них обеспечивает большую точность оценки, т. е. меньшую длину

доверительного интервала. Кроме того, предпочтительно выбрать ПК, для которого случайные величины $\{Q_l(T)\}_l$ имеют какое-нибудь стабильное, одинаковое и хорошо изученное распределение.

- Эмпирическое изучение системы, характеризующейся многими параметрами, затруднительно из-за огромного числа необходимых измерений. Если каждый параметр независимо от остальных принимает хотя бы сто значений, то уже при использовании всего трех параметров необходимо произвести 1 млн измерений. Для элиминирования действия явления «комбинаторного взрыва» стремятся отделить друг от друга влияние (на значение ПК) разных параметров и представить функцию $Q(\vec{l}, T)$ в виде комбинации (суммы, произведения и суперпозиции) функций отдельных параметров. Если ошибка подобной аппроксимации достаточно мала, можно исследовать зависимость $Q(\vec{l}, T)$ от каждого параметра отдельно. Соответственно, из двух ПК предпочтительней тот, который обеспечивает меньшую ошибку аппроксимации.

- Теоретически параметры СР таковы, что при фиксировании значений всех параметров $\vec{l}$, кроме одного, функция одного аргумента Q должна либо иметь локальный максимум, являющийся также и глобальным, либо монотонно зависеть от выбранного параметра. На практике зависимость показателей качества от значений параметров гораздо более сложная, что затрудняет оптимизацию параметров СР. Очевидно, из двух ПК предпочтительней тот, который лучше согласуется с теорией. Зафиксируем значения всех параметров $\vec{l}$, кроме l_k , равными $\vec{l}^*$. Функция $Q^*(l_k, T) = Q(\vec{l}, T)|_{\vec{l}=\vec{l}^*}$, $p \neq k$ при фиксированной тестовой выборке T является дискретизированной (поскольку измерение значений ПК производится в конечном числе точек) функцией $q[i]$. Теоретический характер зависимости $Q^*(l_k, T)$ позволяет установить отношения, которые должны выполняться для пар элементов $q[i]$ и $q[j]$. Пусть, для определенности, функция $Q^*(l_k, T)$ должна монотонно возрастать по аргументу l_k . Тогда должно выполняться $q[i] < q[i+1]$, $\forall i$. На практике для некоторых i условие монотонности нарушается: $q[i] \geq q[i+1]$. Среднее число таких нарушений (при суммировании по всем аргументам) может служить мерой согласия ПК с теорией. При сравнении числа нарушений двух разных ПК, разумеется, необходимо осуществлять проверку значимости.

2. АППРОКСИМАЦИЯ МНОГОМЕРНОЙ ФУНКЦИИ ОДНОМЕРНЫМИ

Аппроксимация с приемлемой точностью многомерной функции одномерными представляет собой весьма нетривиальную задачу. Поскольку нас интересует не минимизация ошибки

аппроксимации, а сравнение значений ошибки для разных ПК, в настоящем исследовании мы ограничимся простейшей моделью аппроксимации. Рассмотрим функцию $F(\bar{x})$ n аргументов $\bar{x}$, заданную ее выборочно измеренными значениями $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, где k -й аргумент x_k , независимо от остальных, принимает N_k возможных значений $\{x_k^i\}_{i=1, \dots, N_k}$. Представим ее в виде суммы функций, каждая из которых зависит только от одного аргумента, а также постоянной и ошибки аппроксимации: $f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n f_i(x_i) + C + E(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

Вычислим дискретизованные функции $f_i(x_i)$, $i = 1, \dots, n$, и постоянную C , минимизирующие сумму квадратов ошибки $E(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

Введем обозначения: $N = \prod_{j=1}^n N_j$, $\hat{N}_k = N_1 \cdot \dots \cdot N_{k-1} N_{k+1} \cdot \dots \cdot N_n = N/N_k$.

Для каждого значения x_k^i каждого аргумента x_k вычислим среднее арифметическое $f'_k(x_k^i)$ значений функции $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, таких, что x_k равен x_k^i , а остальные аргументы пробегают все свои значения. Получим n дискретных функций:

$$\begin{aligned} f'_k(x_k^i) &= \frac{1}{\hat{N}_k} \sum_{x_1, \dots, x_{k-1}, x_{k+1}, \dots, x_n} f(x_1, \dots, x_{k-1}, x_k^i, x_{k+1}, \dots, x_n) \\ &= f_k(x_k^i) + C + \frac{1}{\hat{N}_k} \sum_{x_1, \dots, x_{k-1}, x_{k+1}, \dots, x_n} \sum_{j=1, j \neq k}^n f_j(x_j) + \\ &+ \frac{1}{\hat{N}_k} \sum_{x_1, \dots, x_{k-1}, x_{k+1}, \dots, x_n} E(x_1, \dots, x_{k-1}, x_k^i, x_{k+1}, \dots, x_n) = \\ &= f_k(x_k^i) + C + \sum_{j=1, j \neq k}^n \frac{1}{N_j} \sum_{x_j} f_j(x_j) + \\ &+ \frac{1}{\hat{N}_k} \sum_{x_1, \dots, x_{k-1}, x_{k+1}, \dots, x_n} E(x_1, \dots, x_{k-1}, x_k^i, x_{k+1}, \dots, x_n). \end{aligned}$$

Запишем также выражение для среднего значения $\hat{f}$ функции $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ по всем значениям всех аргументов $\bar{x}$:

$$\begin{aligned} \hat{f} &= \frac{1}{N} \sum_{x_1, x_2, \dots, x_n} f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \\ &= \sum_{j=1}^n \frac{1}{N_j} \sum_{x_j} f_j(x_j) + C + \frac{1}{N} \sum_{x_1, x_2, \dots, x_n} E(x_1, x_2, \dots, x_n). \end{aligned}$$

Очевидно, что для каждого набора значений аргументов $x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i$ справедливо:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n f'_k(x_k^i) - (n-1)\hat{f} &= \sum_{k=1}^n f_k(x_k^i) + nC + \\ &+ (n-1) \sum_{j=1}^n \frac{1}{N_j} \sum_{x_j} f_j(x_j) - \frac{n-1}{N} \sum_{x_1, x_2, \dots, x_n} E(x_1, x_2, \dots, x_n) + \\ &+ \sum_{k=1}^n \frac{1}{\hat{N}_k} \sum_{x_1, \dots, x_{k-1}, x_{k+1}, \dots, x_n} E(x_1, \dots, x_{k-1}, x_k^i, \\ &x_{k+1}, \dots, x_n) - (n-1) \sum_{j=1}^n \frac{1}{N_j} \sum_{x_j} f_j(x_j) - (n-1)C = \\ &= \sum_{k=1}^n f_k(x_k^i) + C + \sum_{k=1}^n \frac{1}{\hat{N}_k} \sum_{x_1, \dots, x_{k-1}, x_{k+1}, \dots, x_n} E(x_1, \dots, \\ &x_{k-1}, x_k^i, x_{k+1}, \dots, x_n) - \frac{n-1}{N} \sum_{x_1, x_2, \dots, x_n} E(x_1, x_2, \dots, x_n). \end{aligned}$$

Отсюда

$$\begin{aligned} f(x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i) &= \sum_{i=1}^n f_i(x_k^i) + C + \\ &+ E(x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i) = \sum_{k=1}^n f'_k(x_k^i) - (n-1)\hat{f} - \\ &- \sum_{k=1}^n \frac{1}{\hat{N}_k} \sum_{x_1, \dots, x_{k-1}, x_{k+1}, \dots, x_n} E(x_1, \dots, x_{k-1}, x_k^i, \\ &x_{k+1}, \dots, x_n) + \frac{n-1}{N} \sum_{x_1, x_2, \dots, x_n} E(x_1, x_2, \dots, x_n) + \\ &+ E(x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i). \end{aligned}$$

Или, обозначив три последних слагаемых как $E'(x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i)$,

$$\begin{aligned} f(x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i) &= \sum_{i=1}^n f_i(x_k^i) + C + \\ &+ E(x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i) = \sum_{k=1}^n f'_k(x_k^i) - (n-1)\hat{f} + \\ &+ E'(x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i). \end{aligned}$$

Каждая из функций f'_k зависит только от одного из аргументов, $(n-1)\hat{f}$ — константа для заданной выборки, $E'(x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i)$ — ошибка аппроксимации. Получено искомое разложение. Убедимся, что константа $(n-1)\hat{f}$ выбрана оптимальным образом. Вычислим минимум суммы (по выборочным значениям) квадратов значений ошибки от-



носителем неизвестного приращения C' постоянного члена разложения:

$$\begin{aligned}
 f(x_1^{i_1}, x_2^{i_2}, \dots, x_n^{i_n}) &= \sum_{k=1}^n f'_k(x_k^{i_k}) - (n-1)\hat{f} + \\
 &+ C' + E(x_1^{i_1}, x_2^{i_2}, \dots, x_n^{i_n}), \\
 \sum_{x_1, x_2, \dots, x_n} (E(x_1, x_2, \dots, x_n))^2 &= \sum_{x_1, x_2, \dots, x_n} \left(f(x_1, x_2, \dots, x_n) - \sum_{k=1}^n f'_k(x_k) + (n-1)\hat{f} - C' \right)^2 \rightarrow \min. \\
 NC'^2 - 2C' \sum_{x_1, x_2, \dots, x_n} \left(f(x_1, x_2, \dots, x_n) - \sum_{k=1}^n f'_k(x_k) + (n-1)\hat{f} \right) &+ \sum_{x_1, x_2, \dots, x_n} \left(f(x_1, x_2, \dots, x_n) - \sum_{k=1}^n f'_k(x_k) + (n-1)\hat{f} \right)^2 \rightarrow \min.
 \end{aligned}$$

Минимизируемая функция является выпуклой вниз параболой, достигающей своего минимума в точке

$$\begin{aligned}
 C' &= \frac{1}{N} \sum_{x_1, x_2, \dots, x_n} \left(f(x_1, x_2, \dots, x_n) - \sum_{k=1}^n f'_k(x_k) + (n-1)\hat{f} \right) = \hat{f} - \frac{1}{N} \sum_{x_1, x_2, \dots, x_n} \sum_{k=1}^n f'_k(x_k) + \\
 &+ \frac{N}{N} (n-1)\hat{f} = n\hat{f} - \frac{1}{N} \sum_{x_1, x_2, \dots, x_n} \sum_{k=1}^n f'_k(x_k) = \\
 &= n\hat{f} - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^n \hat{N}_k \sum_{x_k} f'_k(x_k) = n\hat{f} - \sum_{k=1}^n \hat{f} = 0.
 \end{aligned}$$

Если необходимо изучить поведение зависимости $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ только от некоторых аргументов (пусть для определенности это будут первые m аргументов) аппроксимацию следует произвести в виде:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^m f_i(x_i) + g(x_{m+1}, x_{m+2}, \dots, x_n) + C + E(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

Для этого подмножество аргументов $x_{m+1}, x_{m+2}, \dots, x_n$ представляется в виде одного аргумента x'_{m+1} , после чего повторяются все приведенные рассуждения для разложения функции $f(x_1, x_2, \dots, x_m, x'_{m+1})$ на сумму функций отдельных аргументов:

$$\begin{aligned}
 f(x_1, x_2, \dots, x_m, x'_{m+1}) &= \sum_{i=1}^m f_i(x_i) + g(x'_{m+1}) + \\
 &+ C + E(x_1, x_2, \dots, x_m, x'_{m+1}).
 \end{aligned}$$

3. ОПИСАНИЕ ИССЛЕДУЕМЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА

Как уже говорилось, качество системы распознавания связывается с расхождением между распознанной и априорной последовательностями слов (фонем). Для этого нужно любой паре последовательностей поставить в соответствие вещественное число, равное, например, расстоянию Левенштейна между ними. Расстояние Левенштейна [3] между двумя строками (последовательностями символов) равно минимальному числу операций вставки, удаления и замены символа, необходимому для преобразования первой строки во вторую. При сравнении транскрипций символом служит элемент языка — слово или фонема. Расстояние Левенштейна вычисляется с помощью алгоритма динамического программирования, минимизирующего сумму $S + D + I$, где I , D и S — число операций вставки, удаления и замены соответственно. Обозначим через H число совпадений, а через N_1 и N_2 — число символов в первой и второй строках. Очевидно, выполняются тождества: $N_1 = H + S + D$, $N_2 = H + S + I$. Выбор в качестве метрики расстояния Левенштейна не является строго обоснованным. Однако он интуитивно понятен: для систем диктовки текста расстояние Левенштейна интерпретируется как стоимость редактирования неверно распознанной строки. Соответственно, средняя точность систем диктовки определяется относительным количеством ошибочно распознанных слов (Word Error Rate) [2]:

$$WER = (S + D + I)/N_1,$$

где N_1 — число символов в корректной транскрипции. Этот ПК используется в подавляющем большинстве исследований.

Распространение ПК WER на системы, предназначенные не для транскрибирования звуковой речи, а для ее интерпретации, т. е. проблемно-ориентированные системы, оснащенные речевым интерфейсом (к которым относятся, например, автоматизированная система для бронирования билетов по телефону, робот, воспринимающий речевые команды, и т. п.), наталкивается на ряд противоречий. Речевой поток в таких системах состоит из отдельных, достаточно независимых друг от друга фрагментов [2]. Ошибка в распознавании фрагмента исправляется повторным вводом фрагмента целиком. Редактирование невозможно, соответственно, не имеет смысла выражать качество распознавания через среднюю стоимость редактирования.

Качество распознавания системы интерпретации речи должно быть связано с количеством полученной из речевого сообщения информации. Следовательно, средняя точность должна принимать значения в интервале $[0; 1]$, тогда как значе-

ние WER не ограничено сверху. Пусть в результате распознавания некоторого сообщения $H = 0$. Количество полученной информации равно нулю, однако значение WER не фиксировано и может неограниченно возрастать при увеличении I . Более того, даже в случае транскрибирования речи, значение WER не является истинным размером среднего штрафа: вводимый в компьютер текст, так же, как и в системах прочих типов, делится на фрагменты — предложения. Если стоимость редактирования очередного ошибочно распознанного предложения чересчур велика, лучшим способом коррекции будет повторный ввод предложения целиком. Таким образом, в случае диктовки текста значение ПК также должно быть ограничено снизу. При исследовании свойств алгоритмов распознавания обычно используется не словарная, а фонемная грамматика в целях уменьшения влияния структурных свойств языка на результат. Для фонемной грамматики, независимо от назначения разрабатываемой СР, показатель WER не имеет интерпретации в виде среднего размера штрафа за редактирование ошибок.

Несмотря на указанные недостатки, показатель WER в настоящее время де-факто стал стандартом в области распознавания речи. Предложенные в работе [4] два новых альтернативных показателя MER (Match Error Rate) и WIL (Word Information Lost) остались практически незамеченными исследователями, по-видимому, вследствие отсутствия массового интереса к проблеме выбора ПК в силу привычки. Рассмотрим определение и свойства этих показателей. Показатель MER определяется как среднее число ошибочных пар:

$$MER = \frac{S + D + I}{H + S + D + I} = 1 - \frac{H}{N},$$

где $N = H + D + S + I$ — число пар символов.

В результате применения алгоритма динамического программирования к двум строкам, в общем случае, разной длины они как бы выравниваются друг относительно друга, образуя $H + D + S + I$ пар символов, из которых H корректных (образованных одинаковыми символами из первой и второй строк) и $D + S + I$ некорректных, образованных различающимися или вовсе не имеющими соответствия символами.

Показатель WER рассматривает априорную и распознанную транскрипции как набор независимых пар (аналогично показатель MER), являющихся реализациями двумерной случайной величины, и трактует точность распознавания как меру зависимости между компонентами этой случайной величины. В результате преобразований выводится формула, в которую входят только величины H , I , D и S (вследствие сделанных в ходе рассуждений в работе [4] допущений формула применима

только в случаях, когда I , D и S существенно меньше H):

$$WIL = 1 - \frac{H^2}{N_1 N_2}.$$

Легко видеть, что показатели и MER , и WIL ограничены и принадлежат интервалу $[0; 1]$. Вычисление новых ПК не сложнее вычисления показателя WER . Исследуем теперь экспериментально свойства всех трех ПК согласно сформулированным в § 1 соображениям, для чего прежде всего составим методику эксперимента.

4. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для удобства представления мы будем оперировать ПК Acc (accuracy), Mac (match accuracy) и WIP (word information preserved): $Acc = 1 - WER$, $Mac = 1 - MER$, $WIP = 1 - WIL$.

Цель эксперимента состоит в исследовании свойств трех ПК при распознавании тестовой выборки как фонемной, так и словарной грамматиками. Для проведения измерений сконструируем систему распознавания русской речи, использующую для моделирования речевого сигнала СММ. Для исследования свойств ПК абсолютные значения точности несут незначительную информацию. Поэтому ограничимся простейшими, монофонными СММ, не учитывающими контекст (каждая фонема моделируется одной и той же СММ, независимо от соседствующих фонем; исходя из этих же соображений, от моделирования контекстной зависимости часто отказываются при сравнении эффективности разных акустических признаков, т. е. способов параметрического описания речевого сигнала). Алфавит фонем основывается на фонетической транскрипционной системе русской речи Р.И. Аванесова [5], также применявшейся при разработке речевых баз ISABASE [6] и RuSpeech [7]. Для создания и обучения СММ используется свободно распространяемый инструментальный НТК [8].

Набор параметров СР состоит из числа t итераций обучения, объема a адаптационной речевой выборки (в секундах), объема n активного словаря распознавания (для словарных грамматик) и размера штрафа p за каждый распознанный символ. При распознавании величина p умножается на число символов в распознанной транскрипции и прибавляется к значению ее логарифма правдоподобия. Оптимальный выбор значения p позволяет найти баланс между числом ошибок вставки и удалений и минимизировать суммарное число ошибок. Таким образом, показатель качества имеет вид $Q(t, a, p, T)$ для фонемной грамматики и $Q(t, a, p, n, T)$ для словарной. Для заданных (t, a) или (t, a, n) существует оптимальное значение p , максимизирующее данный ПК. Однако оперировать этим параметром в виде функции $p(t, a)$ или



$p(t, a, n)$ довольно неудобно. Поэтому для удобства этот параметр обычно полагают постоянным. Вычислим для каждого из ПК погрешность, с которой можно принять $p(t, a) = p^*$, где $p^* = \text{const}$. Для этого можно аппроксимировать ПК суммой двух функций, одна из которых зависит от (t, a, n) , а вторая от p :

$$Q(t, a, p, n) = Q_1(t, a, n) + Q_p(p) + E(t, a, p, n),$$

соответственно, $p^* = \arg \max_p Q_p(p)$.

Поскольку требуется найти только оптимальное значение p^* , можно воспользоваться формулой погрешности аппроксимации:

$$E(p) = \sqrt{\sum_{t, a, n} (Q^*(t, a, n) - Q(t, a, p, n))^2},$$

$$p^* = \arg \min_p E(p), \text{ где } Q^*(t, a, n) = \max_p Q(t, a, p, n).$$

Для возможности сравнения значений погрешности $E(p^*)$ разных ПК нужно перевести их в относительную шкалу:

$$E(p) = \frac{2 \sqrt{\sum_{t, a, n} (Q^*(t, a, n) - Q(t, a, p, n))^2}}{\sqrt{\sum_{t, a, n} (Q^*(t, a, n) + Q(t, a, p, n))^2}} \cdot 100 \%. \quad (1)$$

Ошибка $E(t, a, p, n)$ также переводится в относительную шкалу:

$$E_{\text{отн}}(t, a, p, n) = \frac{E(t, a, p, n)}{\max_{t, a, p, n} Q(t, a, p, n) - \min_{t, a, p, n} Q(t, a, p, n)} \cdot 100 \%.$$

Значения ПК измеряются для следующих значений параметров СР: $t \in [3; 72]$, $a \in (0, 60, 120, 300, 600, 1200)$, $p \in [-120; 0]$ (с шагом 0,25), $n \in (20, 40, 60, 100, 200)$. Тестовая выборка T состоит из 58 речевых записей суммарным объемом ~360 с. После того, как для каждого из ПК получена выборка $Q(t, a, p, T)$ или $Q(t, a, p, n, T)$, производится ее статистическая обработка, в ходе которой вычисляются (для каждого ПК отдельно):

- согласие каждой выборки $Q_{t,a,p}(T)$ ($Q_{t,a,p,n}(T)$) с нормальным распределением (по критерию χ^2 [9]);
- доверительный интервал для математического ожидания $Q(t, a, p, n)$;
- оптимальное значение штрафа p^* и соответствующая ему ошибка аппроксимации.

После этого параметр p фиксируется и исследуется выборка $Q(t, a, p^*, T)$ ($Q(t, a, p^*, n, T)$): вычисляется ошибка аппроксимации при разложении на функции независимых аргументов и степень согласия с теоретическим характером функции.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Длина (в относительных единицах) доверительного интервала для математического ожидания всех трех ПК для фонемной грамматики почти не зависит от (t, a) ; независимость также и от p можно принять только для показателей *Mac* и *WIP*. График зависимости (для фонемной грамматики) длины доверительного интервала от p , усредненной по (t, a) , представлен на рис. 1, а. Для всех значений (t, a, p) длина доверительного интервала для показателя *Mac* меньше той же величины для ПК *Acc* и *WIP* (т. е. нет необходимости проверять значимость соответствующей гипотезы). Практически полная независимость длины доверительного интервала от значений всех параметров СР, что можно считать справедливым для ПК *Mac* и *WIP* (для фонемной грамматики), но не *Acc*, означает, что при использовании тестовой выборки фиксированного размера точность оценки математического ожидания ПК не зависит от значений параметров СР. Зависимость (усредненной по (t, a, n)) длины доверительного интервала от p для словарной грамматики приведена на рис. 1, б. Длина интервала по-прежнему минимальна у ПК *Mac*, однако уже не является независимой от параметров СР величиной ни для одного ПК.

Графики оценки зависимости $Q_p(p)$, полученной в результате аппроксимации многомерной функции ПК одномерными, приведен на рис. 2. Максимум по p у ПК *Acc*, *Mac* и *WIP* для фонемной грамматики достигается при значениях -20 , $-15,25$ и $-16,75$, соответственно (-74 , -74 , -74 для словарной грамматики). Зависимости ошибки $E(p)$, вычисленные по формуле (1), изображены на

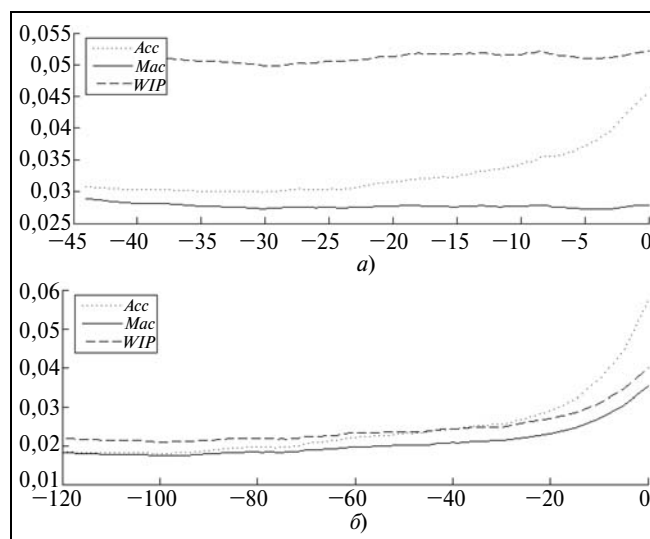


Рис. 1. Длина доверительного интервала в относительных единицах:

а — фонемная грамматика; б — словарная грамматика

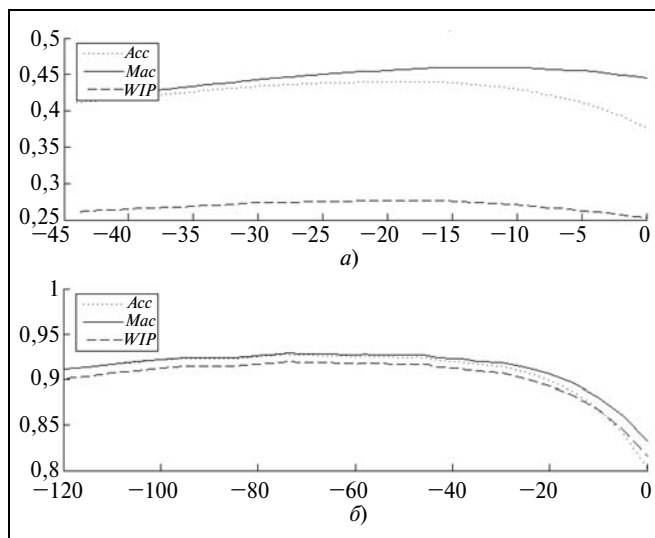


Рис. 2. График оценки зависимости $Q_p(p)$:

а — фонемная грамматика; б — словарная грамматика

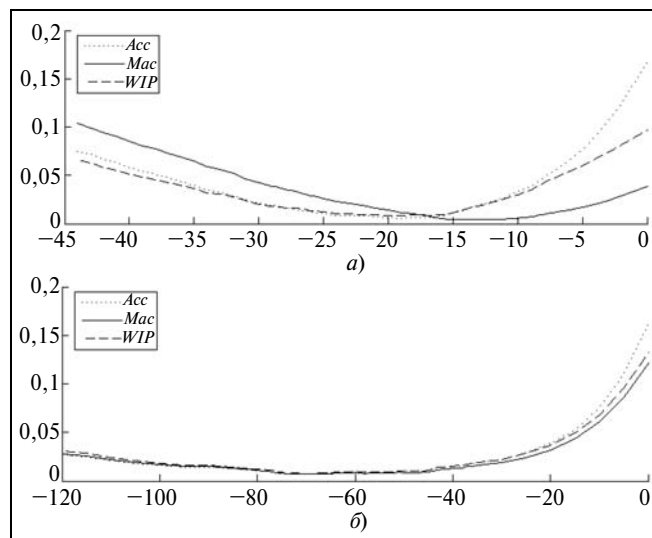


Рис. 3. Зависимости ошибки $E(p)$:

а — фонемная грамматика; б — словарная грамматика

рис. 3. Кроме точечной оценки p^* , вычислена также более надежная, интервальная: интервал $[p_1, p_2]$ такой, что значения $Q_p(p)$ или $E(p)$ (для первого или второго критерия оптимизации, соответственно) в этом интервале отличаются от оптимального не более чем на 1 %. Точечные и интервальные оценки p^* для ПК *Acc*, *Mac* и *WIP* и обеих грамматик, полученные двумя способами, приведены в табл. 1. Оценки, вычисленные двумя способами, мало различаются. В качестве итоговых значений p^* примем среднее значение границ интервальных оценок, являющихся пересечением интервалов, вычисленных двумя способами. Как видно из табл. 1, ошибка аппроксимации, вычисленная по формуле (1), минимальна у ПК *Mac*. Показатели *Acc* и *WIP* характеризуются большей ошибкой.

При вычислении согласия выборки $Q_{t,a,p}(T)$ ($Q_{t,a,p,n}(T)$) с нормальным распределением уровень значимости критерия ведет себя крайне неста-

бильно, даже будучи усредненным по параметрам t , a и n (рис. 4). Можно видеть, что в окрестности оптимальных значений p уровень значимости в среднем выше, чем вблизи граничных. Для примерного сравнения уровней значимости для различных ПК вычислим его среднее в окрестности оптимальных значений p . В качестве окрестностей возьмем вычисленные ранее интервальные оценки. Полученные результаты (см. табл. 1) позволяют заключить, что для фонемной грамматики степень согласия с нормальным распределением у ПК *Acc* и *Mac* примерно одинакова и несколько больше, чем у ПК *WIP*. Для словарной грамматики показатель *Mac* имеет преимущество перед показателями *Acc* и *WIP*. Ввиду нестабильности уровня значимости эта гипотеза для всех трех ПК должна приниматься с осторожностью.

Дальнейшие эксперименты производились с выборкой, где значение штрафа зафиксировано:

Таблица 1

Оценки оптимальных значений p^* и средний в окрестности p^* уровень значимости критерия χ^2

Показатель качества	Уровень значимости критерия χ^2	Оценки, вычисленные через аппроксимацию ПК одномерными функциями		Оценки, вычисленные по формуле (1)		
		Интервальная	Точечная	Интервальная	Точечная	Погрешность аппроксимации, %
Фонемная грамматика						
Acc	0,51	[−22; −15,5]	−20	[−20; −16,75]	−20	1,17
Mac	0,48	[−15,75; 10,25]	−15,25	[−15,5; −10,75]	−15,5	0,81
WIP	0,39	[−20,5; −15,5]	−16,75	[−20; −16,25]	−20	2,52
Словарная грамматика						
Acc	0,12	[−76; −69]	−74	[−76; −64]	−74	0,65
Mac	0,30	[−76; −69]	−74	[−75; −64]	−69	0,53
WIP	0,13	[−76; −69]	−74	[−74; −65]	−74	0,64

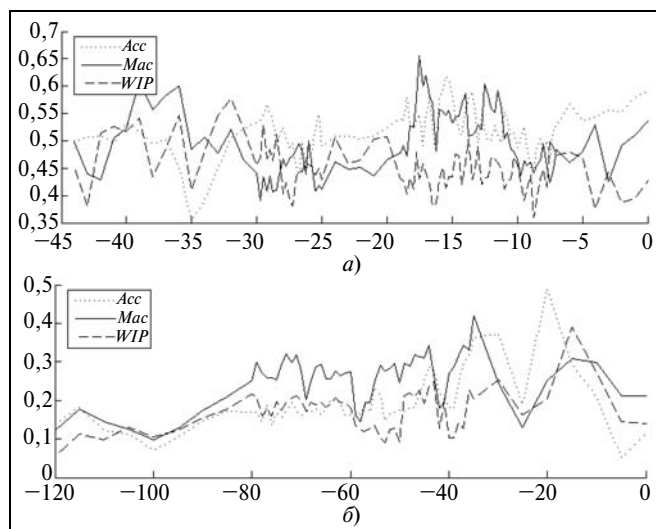


Рис. 4. Степень согласия выборки с нормальным распределением: а — фонемная грамматика; б — словарная грамматика

$p = p^*$. Разложение функций ПК на независимые функции отдельных аргументов $t, a(t, a, n)$ дает примерно одинаковые ошибки для всех трех ПК (и обеих грамматик). Значения ошибок аппроксимации представлены в табл. 2. Число нарушений монотонности для трех ПК совпадает полностью (для преобразования в относительную шкалу эта величина разделена на общее число измерений, см. табл. 2). Таким образом, применение этого критерия позволяет лишь заключить, что новые ПК не хуже показателя *WER*. Поскольку результаты измерений одинаковы, проверять значимость не имеет смысла.

В целом по итогам эксперимента ПК *Mac* продемонстрировал наилучшие результаты. В сравнении с двумя другими ПК он характеризуется меньшей длиной доверительного интервала для матема-

тического ожидания и ошибки аппроксимации при выборе постоянного значения p^* штрафа. Помимо этого, для фонемной грамматики длина доверительного интервала не зависит от параметров *CP*.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как уже отмечалось, цель этой работы состояла не в анализе, насколько правильно связывать качество алгоритмов распознавания речи с оптимальным выравниванием корректной и распознанной транскрипций относительно друг друга (этот вопрос следует считать открытым), а в выборе наилучшего из трех предложенных к настоящему времени показателей качества, базирующихся на метрике Левенштейна. Выполненное экспериментальное исследование свойств трех ПК позволяет сделать вывод о преимуществе метрики *MER* (Match Error Rate) перед метриками *WER* (Word Error Rate) и *WIL* (Word Information Lost) как при исследовании свойств алгоритмов распознавания, так и при вычислении итоговой оценки эффективности систем, ориентированных на интерпретацию речевых сообщений, и рекомендовать для использования именно метрику *MER*. Поскольку простейшая аппроксимация многомерных функций ПК одномерными не выявила существенных расхождений в ошибке (аппроксимации), в дальнейших исследованиях свойств ПК целесообразно применить более сложную модель комбинации одномерных зависимостей, включающую в себя суммирование и суперпозицию функций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rabiner L.R. A Tutorial on Hidden Markov Models and Selected Applications in Speech Recognitions // Proc. of the IEEE. — 1989. — Vol. 77, N 2. — P. 257—286.
2. Huang X.D., Acero A., Hon H. Spoken Language Processing: a guide to theory, algorithm and system development. — New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 2001.
3. Левенштейн В.И. Двоичные коды с исправлением выпадений, вставок и замещений символов // Докл. АН СССР. — 1965. — Т. 163, № 4. — С. 845—848.
4. Morris A.C., Maier V., Green P.D. From WER and RIL to MER and WIL: improved evaluation measures for connected speech recognition // Proc. ICSLP. — 2004.
5. Аванесов Р.И. Русское литературное произношение. — М., 1972.
6. База речевых фрагментов русского языка «ISABASE» / Д.А. Богданов и др. // Интеллектуальные технологии ввода и обработки информации: Сб. тр. Ин-та системного анализа РАН. — М., 1998. — С. 74—85.
7. <http://www.cognitive.ru/innovation/voice-recog.htm> (дата обращения 26.05.2009).
8. <http://htk.eng.cam.ac.uk> (дата обращения 26.05.2009).
9. Ван дер Варден Б.Л. Математическая статистика / Под ред. И.В. Смирнова. — М.: Иностранная литература, 1960.

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

Саакян Артем Александрович — гл. специалист, ФГУП «ЦНИИ «Электроприбор», г. Санкт-Петербург, г. Москва, ☎(812) 232-59-15, 499-78-01, ✉ArtemSaak@mail.ru.

Таблица 2

Ошибки аппроксимации одномерными функциями и относительное число нарушений монотонности в расчете на общее число измерений, %

Характеристика	Показатель		
	Acc	Mac	WIP
Фонемная грамматика			
Ошибка аппроксимации: $Q(t, a) = Q_t(t) + Q_a(a)$	20,1	16,9	14,0
Число нарушений монотонности	26,2		
Словарная грамматика			
Ошибка аппроксимации: $Q(t, a, n) = Q_t(t) + Q_a(a) + Q_n(n)$	67,6	67,1	69,3
$Q(t, a, n) = Q_1(t, a) + Q_n(n)$	34,0	33,3	
$Q(t, a, n) = Q_t(t) + Q_1(a, n)$	31,8	31,5	34,0
$Q(t, a, n) = Q_1(t, n) + Q_n(a)$	22,4	22,3	24,0
Число нарушений монотонности	23,8		

ИЕРАРХИЧЕСКАЯ АДАПТИВНАЯ СЕГМЕНТАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ

О.С. Агаронян

Рассмотрена задача иерархической сегментации изображения путем построения нерегулярной пирамиды. Для моделирования изображения предложен адаптивный подход, предполагающий использование диаграммы Вороного и графа Делоне. Представлена итеративная процедура сегментации для пирамиды с различными уровнями разрешения.

Ключевые слова: иерархическая модель изображения, нерегулярная пирамида, сегментация изображения, мозаичное замощение, диаграмма Вороного, граф Делоне.

ВВЕДЕНИЕ

В машинной графике и обработке изображений широко используются иерархические структуры данных (пирамиды) для моделирования и описания изображений [1]. Необходимость в многоуровневых представлениях обусловлена появлением задач, требующих для своего решения упрощения абстрактных описаний и дискретных представлений сложных структур данных (с сохранением важных топологических свойств). Поэтому при проведении операций над объектами или областями изображения возникает проблема, состоящая в разработке математического аппарата, который позволял бы выполнять действия над частями изображений как над элементарными объектами. Иерархическое представление устраняет необходимость отдельной обработки каждого элемента исходного изображения, а именно: в то время как обычно каждая точка, обрабатываемая ЭВМ, имеет лишь координаты, положение в пространстве, но не имеет формы, пирамидальные структуры позволяют представить в качестве элементарных такие части изображений, которые одновременно имеют и размер, и положение, — это блоки (ячейки) различных уровней. Такой подход позволяет относить к той ли иной области целые фрагменты изображения, соответствующие элементам яркости различных уровней пирамиды. Важно также и взаимное расположение блоков, определяющих форму объекта на изображении. Эту характеристику уже нельзя вывести из «чисто» иерархии — здесь важны «горизонтальные» взаимосвязи блоков различных размеров, вытекающие из топологии объекта.

При обработке изображений чрезвычайно важны алгоритмы просмотра изображений. Например, просмотр дискретного изображения соответствует обходу некоторой дискретной сетки, которую можно интерпретировать как граф: его вершинами служат пиксели, а ребра связывают вершины, соответствующие смежным пикселям. Кроме такого простого отображения, можно построить и другие графы, соответствующие изображению. Развитие методов, основанных на графах, обусловлено тем, что они хорошо адаптируются к выделению формы естественных объектов. Так, в задачах описания и выделения связных регионов обработка изображений упрощается при наличии графа смежности областей. Вершины этого графа соответствуют отдельным областям, а ребра соединяют пары вершин, если соответствующие области смежные. Поэтому целесообразно описывать структуру пирамиды с помощью графа смежности.

Пирамидальные (иерархические) структуры могут использоваться для описания данных, например, в задачах кластеризации и сегментации статических изображений. Под иерархической сегментацией будем понимать последовательность разбиений изображения на вложенные сегменты. Отметим, что составные сегменты на различных уровнях не повторяются. Однако было показано [2], что алгоритмы, основанные на регулярных пирамидах, неинвариантны относительно сдвига (т. е. сегментация изображения и незначительно смещенная версия изображения могут значительно отличаться). Это послужило одним из основных обстоятельств для введения нерегулярных пирамид [3], которые действуют на общую структуру графа вместо регулярных окрестностей (как в слу-

чае регулярных пирамид). По этой причине они предоставляют больше возможностей в процессе построения пирамиды и могут адаптироваться к контексту изображения. Например, использование иерархий сегментов для представления изображения позволяет обеспечивать лучшую аппроксимацию объектов минимальным числом ячеек адекватной формы и размеров. Кроме того, в пирамидах изображений, основанных на регулярных решетках, всегда присутствуют артефакты, обусловленные жесткостью дискретной структуры. С другой стороны, пирамидальное изображение, определенное с помощью нерегулярной дискретной пирамиды, может быть сформировано на основе структуры входного изображения.

Для построения иерархической модели в настоящей статье предлагается использовать в качестве исходного представления изображения не регулярную решетку пикселей, а нерегулярное мозаичное замощение. В качестве замощения применяется диаграмма Г.Ф. Вороного и двойственный ей граф Б.Н. Делоне. Такой подход позволяет получать пирамиды с меньшим числом уровней (по сравнению с инициализацией иерархии от исходного изображения). Поскольку граф Делоне может быть к тому же вычислен параллельно [4], то и весь алгоритм удобен для параллельной обработки.

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЕРАРХИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Пирамидальная структура представляет собой упорядоченную последовательность изображений изменяющегося разрешения, располагаемых обычно одно над другим (рис. 1). Изображение разбивается на определенные блоки, затем процедура

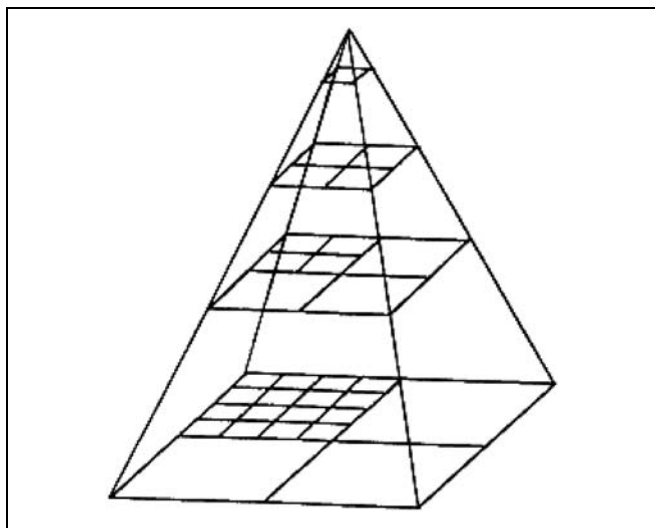


Рис. 1. Пирамида с несколькими уровнями разрешения

разбиения повторяется для каждого блока до тех пор, пока его размер не станет равным размеру элемента исходного изображения. Каждому блоку присваивается значение яркости или цвета. По завершении процесса получается набор изображений, каждое из которых состоит из блоков определенного размера. Эти изображения последовательно уточняют друг друга и сходятся к исходному. Построение пирамиды может идти и обратным путем — от низших уровней к высшим [1].

Пирамидальное описание предполагает некоторый закон перехода от одного уровня пирамиды к другому. Существуют три важные характеристики для описания пирамиды:

- структура, например, соседи, отношения предков-потомков между уровнями;
- содержимое ячейки, например, уровень серого для пикселя;
- обработка, производимая над ячейкой, например, фильтрация.

В настоящей работе рассматривается только структура пирамиды. Обсуждение содержания ячеек и производимой над ними обработки можно найти в работе [5].

1.1. Структура пирамиды

Структура пирамиды изображения определяется отношениями соседства внутри одного уровня пирамиды и отношениями предков-потомков между смежными уровнями. Базовый уровень пирамиды является исходным изображением. Структура пирамиды может быть также представлена графом. В этом случае каждый уровень пирамиды описывается с помощью графа соседства (смежности) $G_i = \langle V_i, A_i \rangle$. Здесь множество вершин V_i соответствует областям уровня i , и $A_i \subseteq V_i \times V_i$ — отношения соседства пикселей. Две вершины $p, q \in V_i$ связаны ребром в графе G_i , если они являются соседними в структуре (т. е. $p, q \in A_i$).

Любая пирамида с n уровнями может быть описана посредством n графов соседства и $n - 1$ вертикальных графов (описывающих связность между уровнями). Необходимо различать регулярные структуры и нерегулярные, зависящие от того, одинаковы ли структурные отношения для всех ячеек пирамиды (кроме граничных) или они могут изменяться от ячейки к ячейке.

В регулярной (классической) пирамиде изображения число пикселей на некотором уровне i в λ раз больше, чем число пикселей на уровне $i + 1$. При этом так называемый коэффициент изменения разрешения $\lambda > 1$ и одинаков для всех уровней [6]. Такое пирамидальное представление предполагает один и тот же закон перехода от одного

уровня пирамиды к другому. Для построения пирамиды задается лишь правило преобразования группы элементов изображений, которое затем распространяется «вширь» — на остальные элементы, и «вглубь» — на другие уровни. Это правило описывает и схему преобразования исходных данных, и результирующую структуру данных; наполнение этой структуры происходит при задании конкретного изображения в качестве входной структуры.

В нерегулярной пирамиде каждый ее уровень представляет собой разбиение множества пикселей на ячейки, т. е. связанные подмножества пикселей. На базовом уровне нерегулярной пирамиды ячейками служат отдельные пиксели исходного изображения, а окрестности ячеек определяются заданной связностью пикселей. На уровне $i + 1$ каждая ячейка (предок) представляет собой объединение соседних ячеек на уровне i (потомков) [3]. Значения каждого предка вычисляются независимо от других ячеек того же уровня, что позволяет проводить параллельные вычисления при обработке таких изображений. Каждый последующий уровень получается из предыдущего с помощью функции снижения разрешения (характеризующей отношение между уровнями).

Структура нерегулярной пирамиды представляет собой не только пучок графов. Она может также рассматриваться как дерево от корня (вершины пирамиды) до листьев (пикселей исходного изображения). Использование древовидной структуры в сегментации изображения означает, что заданный регион любого уровня может последовательно расщепляться на подобласти на следующем, более низком уровне. Просмотр дерева в направлении сверху вниз обеспечивает получение приближенного решения задачи сегментации после обработки $i + 1$ -го уровня дерева, которое является уточнением решения после обработки i -го уровня.

В настоящей работе рассматриваются нерегулярные пирамиды. Известны два пути построения нерегулярной пирамиды: сжатие параллельного графа и снижение разрешения в графе соседства (смежности).

Полный формализм сжатия графа описан в работе [7]. Процесс снижения разрешения делит ячейки некоторого уровня пирамиды на два класса: ячейки, которые сохраняются на следующем уровне, и ячейки, которые не появляются на уменьшенном уровне (несохраняемые). В пирамиде с жесткой структурой априори известно, какие ячейки сохраняются. В случае нерегулярной пирамиды ее архитектура считается полностью определенной, если заданы как способ построения нового уровня, так и связь между предком и его потом-

ками. Тогда одинаковый процесс может быть применен для построения всей пирамиды (уровень за уровнем).

1.2. Нерегулярные пирамиды

Среди существующих подходов к построению нерегулярных пирамид наиболее интересные стохастический и адаптивный [6]. Для построения стохастической пирамиды используется как граф смежности, так и граф подобия. Процесс отбора сохраняемых вершин (или процесс децимации), определяющий процедуру снижения разрешения, задается следующими двумя правилами [3, 8]:

1) две соседние ячейки уровня i не могут быть одновременно сохранены на следующем уровне $i + 1$;

2) для каждой несохраняемой ячейки существует, по крайней мере, одна сохраняемая ячейка в ее окрестности.

Процесс отбора вершин, удовлетворяющий этим условиям, называется «правильным». В теории графов задача определения сохраняемого множества вершин известна как проблема нахождения максимально независимого множества вершин графа [9]. Это означает, что выполнение правил 1 и 2 эквивалентно утверждению, что вершины V_{i+1} графа G_{i+1} на уровне $i + 1$ определяют максимально независимое множество (вершин) для графа $G_i = \langle V_i, A_i \rangle$.

При построении стохастической пирамиды (снизу вверх) вначале всем ячейкам присваиваются случайные числа, а затем отбираются те, в которых достигается локальный максимум. Эти ячейки являются сохраняемыми, а остальные ставятся им в соответствие (используя граф подобия) и формируют поля (называемые рецептивными), которые определяют отношения соседства (рис. 2).

В работе [10] приведен алгоритм стохастического определения сохраняемых ячеек (для однородного случая).

При построении адаптивной пирамиды нет необходимости в использовании графа подобия для

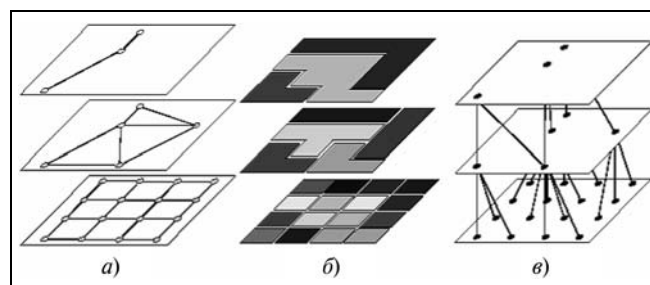


Рис. 2. Соответствие между областями графов смежности (а), рецептивными полями пирамиды (б) и структурой дерева (в)



процесса децимации. Сохраняемые ячейки отбираются в соответствии с графом смежности и с применением так называемой «интересующей характеристики», в качестве которой часто используется однородность областей изображения. В этом случае процедура определения сохраняемой информации состоит в выборе ячеек, представляющих локальные максимумы однородности. Тогда несохраняемые ячейки присоединяются к их наиболее сходным соседям. Таким образом, в случае адаптивной пирамиды выбор сохраняемых ячеек связывается с информацией, содержащейся в изображении. Условия генерации для адаптивной пирамиды аналогичны правилам для стохастической пирамиды.

Основные применения пирамид в обработке изображений встречаются в задачах сегментации на основе замощений, обнаружения объектов и выделения признаков [11—13]. Интерес к использованию нерегулярной пирамиды в задачах анализа изображения объясняется тем, что подобная иерархическая структура представляет собой множество разбиений исходного изображения, в котором форма областей является контекстно-зависимой. Это означает, что структура данных такой пирамиды позволяет выделять детали изображения, для чего каждое из разбиений, т. е. каждый уровень пирамиды, представляется как графом, так и набором рецептивных полей (см. рис. 2). Использование этого графа и свойств областей дает возможность проводить их объединение с помощью итеративного процесса отбора.

В настоящей работе для реализации иерархической сегментации изображения предлагается подход, основанный на построении начального описания изображения с помощью замощения Вороного, которое потом адаптивно улучшается. В следующем параграфе будут кратко изложены некоторые определения и результаты, используемые для построения иерархического изображения на основе многоугольников Вороного.

2. ИЕРАРХИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ МОЗАИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Применение вычислительной геометрии к анализу изображений касается, в основном, проблем определения структур данных. Одно из классических направлений в вычислительной геометрии связано с понятием диаграммы Вороного [14, 15].

Рассмотрим общую процедуру построения так называемых мозаичных моделей, к которым относится и диаграмма Вороного. Процесс моделирования случайной мозаики состоит из двух этапов: заполнения (замощения) области A ячейками с не-

которой структурой и независимого присваивания каждой ячейке одного из цветов $c_1, \dots, c_m$ в соответствии с фиксированным набором вероятностей $p_1, \dots, p_m$, в сумме равных 1. С помощью такого процесса можно осуществить разбиение области A на подобласти $A_1, \dots, A_m$ с различными геометрическими характеристиками, где A_j — объединение всех ячеек цвета j . Следовательно, разбиение A представляет собой реализацию случайного геометрического процесса.

2.1. Диаграмма Вороного и граф Делоне

Наибольшее применение при решении многочисленных и разносторонних практических задач приобрела случайная мозаичная модель Вороного [16—18]. Пусть задан стационарный пуассоновский процесс Φ в пространстве R^2 с некоторой интенсивностью. Разобьем пространство R^2 на ячейки, внутри которых содержится по одной точке процесса Φ , по следующему правилу: точке из процесса Φ ставится в соответствие множество тех точек пространства R^2 , которые являются ближайшими (в смысле евклидовой метрики) к заданной точке, называемой ядром. Таким способом построенные ячейки, называемые многоугольниками Вороного, представляют собой ограниченные выпуклые многоугольники (пересечения полуплоскостей). Полученное замощение плоскости называют мозаикой или диаграммой Вороного.

Пусть точки $s_i \in S$ — ядра многоугольников Вороного. Тогда диаграммой Вороного $V(S)$ множества S является разбиение плоскости на N многоугольников Вороного, вершины которых называются вершинами диаграммы Вороного. Методы построения диаграммы $V(S)$ множества точек достаточно широко освещены в литературе. Наиболее распространен из них двойственный метод построения через триангуляцию Делоне [19]. Поэтому применение диаграммы $V(S)$ для разработки вычислительных алгоритмов связано с вопросом построения триангуляции Делоне $D(S)$ множества S , где $D(S)$ — плоский граф, двойственный диаграмме Вороного (рис. 3). Он получается в результате соединения отрезками точек множества S , многоугольники Вороного которых имеют общее ребро [15].

Модели $V(S)$ и $D(S)$ в последние годы приобретают все больший интерес, поскольку обладают весьма полезными свойствами. Формы многоугольников Вороного отражают свойства локальных пространственных распределений точек. Кроме того, замощение Вороного присваивает каждую область плоскости в качестве окрестности одной и

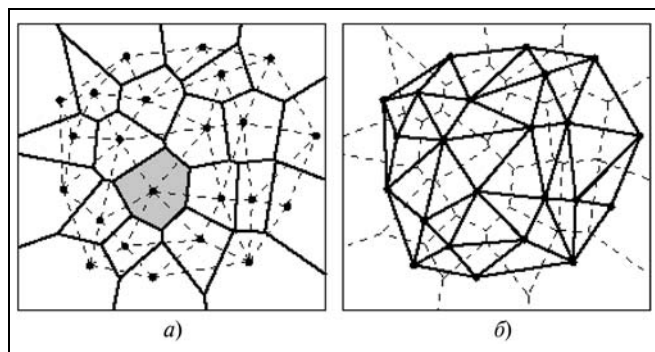


Рис. 3. Диаграмма Вороного (а) и триангуляция Делоне точек на плоскости (б)

только одной точке. Поэтому замощение плоскости дает однозначно порожаемое множество непересекающихся выпуклых областей.

Далее предлагается способ применения замощения Вороного в иерархической структуре для решения задачи сегментации полутонового изображения.

3. АДАПТИВНАЯ СЕГМЕНТАЦИЯ

Предположим, что в качестве исходного замощения изображения при построении иерархической модели применяется диаграмма Вороного. Для описания структуры данных используется представление в виде графа, что позволяет присваивать каждому многоугольнику его генератор (ядро), а также точки смежных многоугольников. При таком подходе связи между предками и потомками в пирамидальной конструкции определяются следующим образом. Предки (т. е. ядра многоугольников Вороного) выбираются при помощи случайного процесса. Тогда ребра определяются двойственной к замощению Вороного триангуляцией Делоне [17]. Соответственно, потомками являются ячейки покрытия, ассоциированного с предками.

Отметим, что пирамида строится сверху вниз. Ее применение позволяет генерировать различные сегментации изображения при различных разрешениях посредством использования древовидной структуры (представленной иерархией графов смежности). В такой структуре любая заданная область некоторого уровня может последовательно расщепляться на следующем, более низком уровне. При этом дерево используется для управления процессом обхода.

Рассмотрим кратко процедуру иерархической сегментации изображения, моделируемого замощением Вороного. Общая идея состоит в следующем: стартуя из случайной сегментации, изображение

итеративно улучшается и сходится к оптимальному разбиению (при заданном статистическом критерии). На первом этапе осуществляется инициализация на основе небольшого числа случайных генераторов, полученных с использованием пуассоновского процесса, что позволяет вычислять диаграмму Вороного с помощью известных методов [19]. На втором этапе в целях адаптации процесса используется принцип «расщепления и слияния» [20].

Пусть каждая точка изображения описывается значением ее уровня серого, а многоугольник Вороного P характеризуется средним значением его пикселей $m(P)$. Стартуя с вершины структуры, критерий однородности вычисляется для каждой области: например, стандартное отклонение в рассматриваемом многоугольнике P сравнивается с пороговым значением $\sigma(P)$ для принятия решения о необходимости дальнейшего расщепления этого региона. Итеративный процесс состоит во введении новых генераторов в неоднородные области и последующей модификации диаграммы Вороного. Процесс продолжается до тех пор, пока все многоугольники можно считать однородными.

Процедура «слияния» областей состоит в удалении «ненужного» генератора. Считаем, что если разность между средними значениями в соседних однородных многоугольниках меньше допустимого значения, то соответствующий генератор можно удалить. В результате смежные многоугольники увеличатся за счет удаленной области. Итеративный процесс, основанный на изменении статистического распределения геометрических областей, продолжается до достижения требуемой сегментации. При этом каждый регион исходного изображения выделяется на том уровне, где его представление — оптимально.

Вопрос о сходимости описанной процедуры сегментации решается по существу эвристически, поскольку сходимость итерационных процессов «расщепления и слияния» определяется на основе заданных статистических параметров и достигается при выполнении соответствующих условий.

Заметим, что помимо указанных статистических характеристик могут использоваться и другие параметры, особенно, если есть априорная информация о текстурированном или зашумленном изображении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен иерархический подход к моделированию изображений. Показано, что иерархическая декомпозиция изображения, обеспечиваемая нерегулярной пирамидой, позволяет получать раз-



личные сегментации на различных уровнях иерархии. Применение нескольких уровней разрешения дает возможность адаптации к характерным свойствам изображения: более гладкие области могут быть представлены с помощью меньшего числа точек, чем те, в которых необходима большая детализация. При этом настройка параметров дает возможность достигать желаемого уровня детализации объектов. Рассмотрены возможности применения диаграммы Вороного в качестве нерегулярного замощения. Предлагаемая инициализация пирамиды посредством графа Делоне приводит к уменьшению вычислений при построении пирамиды, поскольку число ячеек в базовом уровне уже уменьшено. Адаптация алгоритма реализуется на основе итерационной процедуры, позволяющей в интерактивном режиме выделять объект при наилучшем разрешении для заданных статистических характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров В.В., Горский Н.Д. Представление и обработка изображений. Рекурсивный подход. — Л.: Наука, 1985. — 192 с.
2. Bister M., Cornelis J., Rosenfeld A. A critical view of pyramid segmentation algorithms // Pattern Recognition Lett. — 1990. — Vol. 11, N 9. — P. 605—617.
3. Meer P. Stochastic Image Pyramids // Computer Vision, Graphics Image Process. — 1989. — Vol. 45. — P. 269—294.
4. Saxena S., Bhatt C.P., Prasad V.C. Efficient VLSI parallel algorithm for Delaunay triangulation on orthogonal tree network in two and three dimensions // IEEE Trans. Comput. — 1990. — Vol. 38, N 3. — P. 400—404.
5. Bischof H., Kropatsch W.G. Neural networks versus image pyramids // Artificial Neural Networks and Genetic Algorithms / Ed. by R.F. Albrecht, C.R. Reeves. — Berlin New York: Springer-Verlag. — 1993. — P. 137—144.
6. Агаронян О.С. Идентификация статических объектов с использованием методов обработки иерархических изображений // Тр. VII междунар. конф. «Идентификация систем и задачи управления» (SICPRO'08). — М.: Институт проблем управления, 2008. — С. 347—357.
7. Kropatsch W.G., Leonardis A., Bischof H. Hierarchical, adaptive and robust methods for image understanding // Surveys on Mathematics for Industry. — 1999. — N 9. — P. 1—47.
8. Jolion J.M. Stochastic pyramid revisited // Pattern Recognition Letters. — 2003. — Vol. 24. — P. 1035—1042.
9. Luby. M. A simple parallel algorithm for the maximal independent set problem // SIAM Journ. of Computing. — 1986. — Vol. 15, N 4. — P. 1036—1053.
10. Агаронян О.С. Об одном методе моделирования адаптивного изображения // Тр. V междунар. конф. «Идентификация систем и задачи управления» (SICPRO'06). — М.: Институт проблем управления, 2006. — С. 306—315.
11. Burt P., Hong T., Rosenfeld A. Segmentation and estimation of image region properties through cooperative hierarchical computation // IEEE Trans. Syst. Man. Cybern. — 1981. — Vol. 11, N 12. — P. 802—809.
12. Montanvert A., Meer P., Bertolino P. Optimal hierarchical shape analysis in grey level images // Proc. of the NATO Advanced Workshop «Shape in Picture». — Driebergen, The Netherlands, September 7—11. — Springer Verlag, — 1992. — Vol. 126. — P. 13—34.
13. Peleg S., Federbusch O., Hummel R. Custom-made pyramids // Parallel Computer Vision. — 1998. — P. 125—146.
14. Вороной Г.Ф. Исследования о примитивных параллелоэдрах. Собр. соч. / Под ред. И.М. Виноградова. — Киев: Изд-во АН УССР, 1952. — Т. 2. — С. 293—369.
15. Препарата Ф., Шеймос М. Вычислительная геометрия: Введение. — М.: Мир, 1989. — 478 с.
16. Ласло М. Вычислительная геометрия и компьютерная графика на C++. — М.: Бином, 1997. — 304 с.
17. Агаронян О.С. Статистические аспекты применения диаграмм Вороного в задачах обработки изображений // Автоматика и телемеханика. — 1999. — № 4. — С. 58—64.
18. Rom H., Peleg S. Image representation using Voronoi tessellation: adaptive and secure // IEEE Comput. Vision Pattern Recognition. — 1988. — P. 282—285.
19. Watson D.F. Computing the n-dimensional Delaunay tessellation with application to Voronoi politopes // Comput. J. — 1981. — Vol. 24, N 2. — P. 167—172.
20. Павлидис Т. Алгоритмы машинной графики и обработки изображений. — М.: Радио и связь, 1986. — 400 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Л.П. Боровских.

Агаронян Ольга Сергеевна — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, Институт проблем управления РАН им. В.А. Трапезникова, г. Москва, ☎(495) 334-91-61, ✉ kirillium@mail.ru.

Новая книга

Александров А.Г. Методы построения систем автоматического управления. — М.: Физматлит, 2008. — 232 с.

Изложены методы синтеза регуляторов и адаптивного управления, позволяющие построить алгоритмы управления объектами по их линейным моделям. Данные методы опираются на процедуры LQ - и H_∞ -оптимизации и конечно-частотную идентификацию, а алгоритмы обеспечивают требуемую точность регулирования при ограниченных неизвестных внешних возмущениях, действующих на объект. Описана доступная программная система ГАММА, являющаяся программным обеспечением части излагаемых методов и позволяющая оценить их эффективность при построении реальных систем.

Для инженеров-разработчиков современных систем автоматического управления и студентов соответствующих специальностей.

ОБЩЕРОССИЙСКИЙ СЕМИНАР «СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ: ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ АВТОНОМНЫХ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ»

31 марта 2009 г. в Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН уже в четвертый раз состоялся общероссийский семинар «Современные методы навигации и управления движением». Идея проведения такого семинара возникла на юбилейном собрании Академии навигации и управления движением (АНУД) в 2005 г. в связи с тем, что сейчас существует заметный разрыв между современными результатами, полученными в теории управления движением, и их применением в реальных проектно-конструкторских решениях. Этот разрыв отмечался и ранее, в частности, на Конференции по теории управления, посвященной юбилею академика Б.Н. Петрова в 2003 г., проходившей в ИПУ РАН, и на ряде других конференций у нас в стране и за рубежом.

Первый семинар состоялся 18–19 апреля 2006 г. в целях взаимного ознакомления с последними достижениями в решении вопросов навигации и современной теории управления представителей академических институтов и предприятий научно-исследовательского, опытно-конструкторского и промышленного профилей. В его работе приняли участие ведущие представители различных предприятий, занимающихся вопросами навигации, а также представители некоторых современных школ по теории управления движением. Доклады — всего их было 17 — были объединены тематически в четыре группы и заслушивались на соответствующих заседаниях — перспективные методы навигации (председатель академик *В.Г. Пешехонов*), робастные методы решения задач обработки информации и управления (председатель *Б.Т. Поляк*), методы решения задач обработки информации и управления (председатель *А.Л. Фрадков*), методы искусственного интеллекта в задачах обработки информации и управления (председатель — тогда чл.-корр. РАН — *С.Н. Васильев*). Семинар вызвал интерес, однако его формат был не вполне удобен для слушателей, поэтому было решено впредь проводить семинар ежегодно по определенной тематике и в течение одного дня.

Второй семинар состоялся 25 апреля 2007 г. и был посвящен информационному обеспечению задач высокоточной навигации и управления. Открывал семинар руководитель Секции проблем машиностроения и процессов управления ОЭММПУ РАН академик *Е.А. Федосов*. На утреннем (председатель академик *Е.А. Федосов*) и вечернем (председатель *Б.Г. Гурский*) заседаниях было заслушано 10 докладов.

Третий (23 апреля 2008 г.) был посвящен компьютерным технологиям в моделирующих, исследовательских и тренажерных комплексах. На утреннем заседании (сопредседатели — академики *В.Г. Пешехонов* и *Е.А. Федосов*) было шесть докладов, вечером (сопредседатели — академик *С.Н. Васильев* и *В.Л. Солунин*) — пять. В заключительном слове академик *С.Н. Васильев* отметил возрастающий интерес к семинару и присутствие в зале молодых ученых и разработчиков систем навигации и управления из различных вузов Москвы.

Нынешний, четвертый по счету, семинар был посвящен информационно-управляющим системам автономных движущихся объектов.

В организации семинара участвовали Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН, Российский национальный комитет по автоматическому управлению, АНУД, Объединенный научный совет РАН по комплексной проблеме «Процессы управления и автоматизация», Научный совет РАН по теории управляемых процессов и автоматизации, ИПУ РАН, ОАО Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», ЦНИИ автоматики и гидравлики.

Открывая семинар, директор ИПУ РАН академик *С.Н. Васильев* отметил возрастающий в сообществе разработчиков систем управления интерес к семинару. В своем вступительном слове директор ОАО Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», президент АНУД академик *В.Г. Пешехонов* отметил большую актуальность выбранной для семинара тематики, ее сосредоточенность на освещении выбранного вопроса.



На утреннем заседании председательствовал академик *В.Г. Пешехонов*. К сожалению, по уважительной причине не состоялся запланированный первым доклад «Основные принципы управления боевых беспилотных летательных аппаратов», с которым должен был выступить чл.-корр. РАН *С.Ю. Желтов*.

В докладе «Баллистика, навигация и управление движением космического аппарата на этапе его посадки на поверхность Фобоса» (авторы — чл.-корр. РАН *Э.Л. Аким*, *С.М. Лавренов*, *В.А. Степаньянц*, *А.Г. Тучин* (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН), *Ю.К. Зайко*, *Е.Г. Рузский* (НПО им. С.А. Лавочкина)), который сделал *Андрей Георгиевич Тучин*, были представлены основные концепции и алгоритмы, лежащие в основе схемы посадки на спутник Марса Фобос, разрабатываемой в рамках проекта «Фобос-Грунт». Приведены условия, обеспечивающие посадку, изложены алгоритмы бортовой навигации и управления. Рассмотрены уравнения движения космического аппарата (КА) относительно Фобоса и их использование для расчёта коррекции движения КА. Представлен алгоритм оценки вектора состояния КА по измерениям лазерного высотомера и доплеровского измерителя скорости и дальности. Описана система моделирования посадки на программно-аппаратном комплексе, включающем в себя макет бортовой вычислительной машины. Разработанные модели и алгоритмы достаточно универсальны, и их можно использовать при создании систем посадки КА на малые спутники планет, астероиды, Луну и другие небесные тела.

Доклад *Л.В. Киселева*, *А.В. Инзарцева*, *Ю.В. Матвиенко* «Навигационно-управляющие системы автономных подводных роботов» представил опыт Института проблем морских технологий ДВО РАН по созданию навигационно-управляющих систем серии аппаратов, разработанных в этом институте. *Лев Владимирович Киселев*, выступавший от имени авторов, представил не только принципы построения навигационно-управляющих систем, но на богатом иллюстративном материале продемонстрировал действующие образцы автономных подводных роботов.

В своём выступлении *Тамаз Автандилович Барамидзе* (Управление развития и организации заказов кораблей, морского вооружения и военной техники Минобороны РФ) «Проблемные вопросы организации создания и производства морской робототехники в России» отметил, что в нашей стране истинные роботы и, тем более, автономные необитаемые подводные аппараты-роботы (АНПАР), как таковые, не только отсутствуют, но даже нет сколько-нибудь значимых программ по их созданию. По мнению докладчика, для ВМФ наибольший интерес представляют АНПАР водоизмещением более 25 т. Такие аппараты, из-за способности

нести значительную полезную нагрузку и большой запас топлива, наиболее приспособлены к решению широкого круга задач ВМФ. Сверхтяжелые аппараты-роботы водоизмещением свыше 40 т способны решать и некоторые задачи, которые сейчас возлагаются на подводные лодки. Подавляющее большинство технологий, необходимых для создания подводных аппаратов-роботов, могут быть заимствованы в авиационно-космической промышленности. Учитывая важность и перспективность для военных применений роботизированной техники, а также межведомственную и межвидовую направленность работ, задачи по созданию предприятий-центров и специализированного органа военного управления целесообразно решать в соответствии с отдельной федеральной целевой программой.

Последним на утреннем заседании был заслушан доклад *А.Е. Барабанова* и *Д.В. Ромаева* (Санкт-Петербургский государственный университет) «Синтез полного автопилота легкого вертолета». Докладчик *Андрей Евгеньевич Барабанов* представил реальную летающую систему управления легкого вертолета, реализованную на серийной находящейся в продаже модели легкого вертолета. Красочный фильм убедительно показал собравшимся большие возможности представленного автопилота, в частности, реализацию наиболее сложных для выполнения вертолетом пилотных заданий (например, режим зависания). Доклад продемонстрировал реальное взаимодействие математических методов навигации и управления при решении сложной технической задачи.

Вечернее заседание под председательством *Б.Г. Гурского* началось с доклада *О.С. Салычева* (ООО «ТекНол») «Системы управления беспилотных летательных аппаратов». В своем выступлении Олег Степанович познакомил слушателей с разработками своего предприятия в области создания легких беспилотных летательных аппаратов. Особое внимание было уделено тому, что созданные в ООО «ТекНол» системы управления сертифицированы и пользуются большим спросом на рынке систем управления беспилотными аппаратами. Так, ООО «ТекНол» уже продало более полутора тысяч систем управления.

В докладе *Александра Ивановича Иванова* (ИПУ РАН) «Беспроводная информационно-управляющая система малого автономного необитаемого подводного аппарата» отмечено, что современный уровень развития микроэлектроники и нанотехнологий позволяет существенно сократить габариты и энергопотребление электронных блоков малых автономных необитаемых аппаратов (АНПА), расширив при этом их функциональные характеристики. Благодаря возможности самостоятельно перемещаться, АНПА могут ускорить спасение экипажа, облегчить поиск потерпевшего аварию

судна. Подобные аппараты могут выполнять и самостоятельные задачи разведки, патрулирования, формирования ложных целей, гидрографических и экологических исследований. Один из основных компонентов АНПА — микросхема, объединяющая микропроцессор и радиомодем. Совокупность таких микросхем с подключенными к ним датчиками и исполнительными органами образует самоорганизующуюся информационно-управляющую структуру, обладающую повышенной отказоустойчивостью, экономичностью и гибкостью. В докладе приведены схема малого АНПА и примеры реализации алгоритмов поведения АНПА в различных эксплуатационных режимах.

Следующим был заслушан доклад *М.Н. Красильщикова* и *Н.В. Кима* (МАИ) «Интегрированная бортовая система навигации и управления беспилотного летательного аппарата малого класса», который сделал *Николай Владимирович Ким*. Рассматривались вопросы построения системы навигации и управления (САУ) малоразмерного беспилотного летательного аппарата (МБЛА) с учетом характеристик используемых микромеханических датчиков и особенностей динамики МБЛА. В качестве приоритетных направлений совершенствования САУ были названы внедрение механизмов адаптации в контуры стабилизации САУ, автоматизация посадки на необорудованные площадки и автоматизация планирования и оперативного изменения полетного задания МБЛА. В частности, на основе применения целевой видеоаппаратуры при решении навигационных задач и реализации интеллектуальных технологий «понимания» текущих ситуаций. Предложен комплексный алгоритм обработки изображений, позволяющий реализовать решение целевых и навигационных задач, включая автоматическую посадку МБЛА на необорудованную площадку.

В докладе *Вадима Вячеславовича Костюкова* (ЦНИИ автоматики и гидравлики) «Опτικο-электронная система навигации беспилотного летательного аппарата (БПЛА)» были рассмотрены вопросы создания и применения опτικο-электронной системы (ОЭС) навигации для БПЛА разрабатываемого для мониторинга объектов протяженной инфраструктуры. Особенность предложенных алгоритмов ОЭС состоит в отсутствии ортотрансформирования текущих изображений, вместо которого предложено проследивать путь на эталонном изображении с помощью сшитого текущего изображения. Предложенный алгоритм позволяет решать целевую задачу с высокой точностью и оперативностью без необходимости точного определения ориентации БПЛА. Обновление эталонной информации, с помощью результатов мониторинга, позволило снизить требования к информационному обеспечению ОЭС.

Доклад *И.В. Рубцова* и *В.П. Носкова* (МГТУ им. Н.Э. Баумана) «Навигационно-управляющие системы автономных мобильных роботов», сделанный *Владимиром Петровичем Носковым*, был посвящен принципам построения навигационно-управляющих систем для мобильных гусеничных роботов. Иллюстративный материал, на котором был показан опытный образец, показал возможности таких роботов в различных сферах народного хозяйства.

Последним в работе семинара был доклад *В.В. Матвеева* и *В.Я. Распопова* (Тульский государственный университет) «Бесплатформенная система ориентации вращающегося по крену летательного аппарата». В работе рассмотрены алгоритмы построения бесплатформенных систем ориентации (БСО) вращающихся по крену летательных аппаратов (ЛА) на базе гироскопических датчиков угловой скорости и акселерометров. Выступавший *Валерий Владимирович Матвеев* отметил, что классический алгоритм идеальной работы БСО, реализующий модифицированный метод Эйлера с коррекцией нормы кватерниона, в случае вращения ЛА по крену приводит к возникновению фазовых погрешностей. Поэтому период дискретизации должен быть не более 0,0001 с, чтобы алгоритм идеальной работы не вносил значительных фазовых погрешностей. Показано, что вращение ЛА по крену приводит к тому, что отсутствует тенденция к нарастанию ошибок БСО при неидеальных измерениях угловой скорости. Приведена модель погрешностей БСО для вращающегося по крену ЛА. Предложены алгоритмы БСО, построенные на базе только двух датчиков угловой скорости и приведены результаты моделирования такого алгоритма. Рассмотрена схема БСО, в которой для измерения угловой скорости крена используется пара акселерометров с осями чувствительности, ортогональными продольной оси ЛА.

В завершение работы семинара выступил директор ОАО Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», президент АНУД академик *В.Г. Пешехонов*. Он отметил высокий научный и организационный уровень семинара, большой к нему интерес (на семинаре присутствовало около 300 чел.), активность слушателей (до самого окончания семинара конференц-зал, в котором проходили заседания, был практически полон) и выразил надежду, что следующий семинар в 2010 г. пройдет на соответствующем уровне.

Б.В. Павлов, А.П. Курдюков, Д.А. Гольдин

Павлов Борис Викторович — д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник, ☎(495) 334-93-51, ✉pavlov@ipu.ru,

Курдюков Александр Петрович — д-р техн. наук, зав. лабораторией, ☎(495) 334-92-41, ✉akurd@ipu.ru,

Гольдин Дмитрий Алексеевич — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, ☎(495) 334-89-51, ✉goldind@ipu.ru, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва.



IV МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ПРОБЛЕМЫ РЕГИОНАЛЬНОГО И МУНИЦИПАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ»

Конференция состоялась 23 марта 2009 г. в Российском государственном гуманитарном университете. Организаторы — Российский государственный гуманитарный университет, Институт проблем управления им. В.А.Трапезникова РАН и Мэрия г. Москвы.

Тематика конференции отличалась особой актуальностью, поскольку в условиях финансово-экономического кризиса резко возрастает сложность социально-экономических проблем. Возрастает и роль органов исполнительной власти всех уровней в ликвидации последствий кризиса. Этим во многом объясняется интерес к проблемам повышения эффективности и результативности регионального и муниципального управления, поиску путей решения которых и посвящено большинство представленных работ.

В конференции приняли участие 112 авторов, приславших 82 доклада из Москвы, различных регионов России и зарубежных государств.

Работа конференции велась по следующим направлениям, ставшим в последние годы традиционными:

- муниципальный менеджмент (секция 1),
- экономические проблемы регионов (секция 2),
- информационно-управляющие системы (секция 3),
- проблемы безопасности информационных технологий (секция 4),
- правовые аспекты и кадровое обеспечение регионального и муниципального управления (секция 5).

В докладах, представленных на **первой и второй секциях**, рассмотрен широкий круг теоретических, методологических и практических проблем совершенствования управления развитием регионов и муниципальных образований.

Большой интерес вызвали работы, посвященные поиску методов решения проблем повышения качества и результативности государственного управления на различных уровнях. В докладе *Н.И. Архиповой, О.Л. Седовой* «Оценка эффективности государственного и муниципального управления» основное внимание уделено анализу содержания методик оценки эффективности государственного и муниципального управления, широко применяемых в практике управления социально-

экономическими системами. Авторы отметили, что, с одной стороны, данные методики оценки принципиально обеспечивают возможность проведения системного (проблемного) мониторинга результативности государственного и муниципального управления, способствуя тем самым совершенствованию системы управления в целом, с другой — интегральная оценка результатов управления социально-экономической сферой не всегда отвечает требованиям объективности и достоверности. Подчеркивается, что в настоящее время оценка деятельности органов исполнительной власти неизбежно отождествляется с оценкой развития социально-экономической ситуации на территории страны, региона и муниципального образования в целом. Кроме того, принятая система оценки не всегда включает в себя показатели, характеризующие непосредственные результаты деятельности органов власти разных уровней. Поэтому наряду с использованием базовых социально-экономических показателей предлагается больше внимания уделять оценке результатов деятельности органов управления с позиций достигнутого эффекта для конечных потребителей, т. е. граждан, в повышении уровня жизни которых и состоит главная цель социального государства.

Среди наиболее интересных работ в рассматриваемом направлении необходимо выделить доклады *В.А. Сердюкова* «Региональное управление в условиях кризиса», *О.Ю. Артёмова, Н.В. Овчинниковой* «Условия и факторы устойчивого социально-экономического развития муниципального образования», *Л.С. Адарчевой* «Взаимодействие государственного и муниципального управления в зарубежных странах», *С.В. Смирнова* «Практика проведения местных референдумов по решению социально-экономических проблем муниципальных образований», *С.Я. Бурд* «Организация системы местного самоуправления в городе Москве», *А.И. Портнягина* «Парадоксы функции контроля в административной деятельности органов государственного и муниципального управления».

Социальные аспекты регионального развития рассматриваются в следующих работах: *В.Г. Доброхлеб* «Новые подходы к анализу демографического развития регионов России в условиях кризиса», *Д.Д. Деньгин* «Проблемы изучения и использования

регионального научного и инновационного потенциала (на примере Нижегородской области)», *Е.В. Богатырева, Л.В. Богатырева* «Особенности государственной политики в сфере пенсионного обеспечения в регионах».

Теоретическим проблемам применения сценарного подхода к исследованию проблем устойчивого развития региональных социально-экономических систем посвящен доклад *Н.И. Архиповой, Д.А. Кононова, В.В. Кульбы* «Сценарные технологии: распределенное пакетное управление развитием региональных систем». Основное внимание авторы уделили изложению результатов разработки формализованных методов синтеза синергических (моделирующих поведенческие аспекты исследуемой системы) и аттрактивных (отражающих поведение объекта при наличии целенаправленных управляющих воздействий) сценариев устойчивого развития региональных социально-экономических систем. Сценарный подход к задачам моделирования динамики развития сложных социально-экономических систем авторы реализуют с помощью языка взвешенных ориентированных знаковых графов, аппарат которых позволяет формально строить сценарии их поведения при различных условиях. Данный аппарат позволяет сочетать формальные и экспертные методы анализа сложных систем. Сценарий представляет собой описание процесса изменения параметров объекта моделирования и позволяет фиксировать принципиальные с точки зрения исследователя или лица, принимающего решения, моменты перехода объекта в новое качественное состояние (т. е. выделять из траектории движения исследуемой системы только экспертно-значимые события). Для синергических сценариев изучаются прежде всего режимы, обеспечивающие устойчивое, бескризисное развитие социально-экономических систем рассматриваемого типа. Для аттрактивных сценариев авторами предложен новый тип технологий управления: распределенные пакетные управления, позволяющие формализовать как задачи прямого, так и обратного сценарного управления, а также строить для их решения эффективные вычислительные схемы для различных типов управлений и критериев их согласованности.

Как известно, в условиях финансово-экономического кризиса возрастает интерес, прежде всего, к проблемам повышения эффективности функционирования реального сектора экономики, транспортной и энергетической инфраструктуры, кредитно-финансовых механизмов, а также вопросам развития малого предпринимательства.

Проблемам повышения эффективности управления промышленным комплексом посвящены

доклады *Н.В. Корякиной* «Стратегическое управление как фактор повышения конкурентоспособности предприятий местной промышленности», *В.Н. Меркулова, А.С. Болтенковой* «Проблемы сочетания регионального и отраслевого антикризисного управления промышленными предприятиями», *Е.Г. Карновой* «Региональные аспекты деятельности вертикально-интегрированных предприятий», *Д.И. Воробьева* «Задача оптимизации издержек обращения в зерновом обеспечении России», *А.А. Банчевой* «Проблемы территориального маркетинга», *К.А. Чистяковой, Е.М. Ланге, С.А. Овчинникова* «Аутсорсинг в России: проблемы и перспективы».

Вопросы развития транспортной и энергетической инфраструктуры рассмотрены в следующих работах: *А.Г. Некрасов* «Развитие SCЕМ-систем — инструмент обеспечения безопасности регионально-транспортной системы», *Б.Б. Буянов, Г.Л. Поляк* «Регулирование транспортного потока на кольцевой автомагистрали», *В.В. Скопин, Л.А. Середа* «Особенности автоматизации технического энергоаудита муниципального хозяйства», *А.Л. Арутюнов* «Проблемы потребления энергоресурсов в сельскохозяйственном производстве России», *Ю.В. Самойлова* «Повышение безопасности международных перевозок опасных грузов автомобильным транспортом».

Анализ проблем совершенствования кредитно-финансовых механизмов управления дан в докладах *Т.В. Елисеевой* «Об анализе причин кризиса ипотечного кредитования», *А.А. Белова, О.Н. Беловой* «О системе показателей деятельности подразделений кредитной организации», *О.А. Жученко* «Проблемы формирования финансовых ресурсов муниципальных органов управления», *В.В. Коокуевой* «Специфика формирования доходов бюджетов дотационных регионов».

Достаточно интересные работы посвящены проблемам государственной поддержки развития малого предпринимательства, среди которых можно выделить доклады *А.К. Гусева* «Государство и малый бизнес: проблемы взаимодействия», *Г.А. Шишковой, Е.А. Шишковой* «Проблемы экономического развития малого предпринимательства в регионах», *И.В. Чернова, М.А. Шелкова, М.Ю. Гладкова* «Анализ и оценка эффективности механизмов государственной поддержки малого предпринимательства в условиях экономического кризиса».

В ряде работ рассмотрены практические аспекты управления региональным развитием, среди которых отметим следующие доклады: *М.А. Омурбеков* «Мониторинг и оценка эффективности стратегии развития территориальных образова-



ний Кыргызской республики», *Е.В. Афанасьева* «Основные пути развития Республики Башкирия в условиях экономического кризиса», *В.Б. Буланов, В.В. Кульба, О.А. Шулигина* «Сценарии развития Амурской области», *Д.А. Кононов, П.Е. Рошин* «Сценарный анализ социально-экономического развития Смоленской области», *В.С. Бырдин, О.М. Цеханович* «Мониторинг экологической обстановки в условиях малого города для решения социально-экономических проблем (на примере Гжельской местности Московской области)», *Б.К. Тебиев, А.Е. Логинов* «Экономические проблемы Краснодарского края и пути их решения».

Доклады, заслушанные на заседании **третьей секции**, можно условно разделить на две группы: работы, посвященные рассмотрению методологических проблем разработки информационных систем различного типа, и работы, в которых основное внимание уделено обобщению опыта автоматизации процессов муниципального и регионального управления.

В докладе *С.А. Косяченко, А.И. Кранчатова* «Методология повышения качества отладки и внедрения программного обеспечения функциональных задач автоматизированных информационно-управляющих систем» рассмотрен комплекс методов и моделей планирования и организации системной отладки программных средств автоматизированных систем. Разработанная авторами методология основана на представлении системной отладки в виде многоэтапного итеративного процесса получения комплекса программ с заданным множеством показателей качества, характеризующих степень отлаженности программного обеспечения и пригодности системы к вводу в эксплуатацию. Рассматриваемая методология обеспечивает решение задач формирования оптимальной стратегии отладки, выбора оптимальных наборов тестов для обнаружения и локализации ошибок, определения оптимальной последовательности действий при тестировании физической реализуемости комплексов программ, оптимизации процедур поиска и локализации ошибок в программах.

Вопросы разработки методологии решения различных задач проектирования автоматизированных систем рассматривались также в работах *С.К. Сомова* «Оптимизация вычислительных и информационных задач в GRID сетях», *М.А. Ищенко* «Моделирование систем обработки данных с использованием сетей Петри», *А.А. Кочкарова, С.П. Никищенко, А.Р. Салпагровой* «Сетевые системы и структурное распознавание», *Л.А. Сысоевой* «Использование процессного подхода к управлению информационными технологиями в организации», *Ф.Ю. Чанхиевой* «О критериях эффективности

информационно-поисковых систем», *Р.П. Агаева, С.В. Никифорова* «О ранжировании Web-страниц в Интернете поисковой машиной Google», *С.Н. Грудцина* «ИНТЕРКОМП-технология и ее применение в научно-технической деятельности», *Н.Н. Заличева, П.И. Мачкина* «СемАн-технология и ее применение в научно-технической деятельности».

Ряд достаточно интересных работ посвящен анализу эффективности использования современных информационных технологий при решении практических задач регионального и муниципального управления. Среди них выделим доклады *Г.Г. Гребенюка, С.М. Никишова* «Особенности формирования отраслевых информационных систем для муниципального хозяйства», *А.Д. Козлова, И.Н. Мараканова* «Принципы технологии одного окна» для граждан, предпринимателей и государственных органов в системе регистрации прав на земельные участки и сделок с ними», *К.В. Калачева, А.А. Крыгина* «Особенности создания информационной системы обеспечения градостроительной деятельности», *А.В. Третьякова* «Программный комплекс для создания муниципальных Web-сайтов», *В.Л. Мартынова, А.Б. Шелкова, Ю.М. Гладкова* «Автоматизация мониторинга процессов обеспечения инвалидов техническими средствами реабилитации».

Вопросы разработки методологии проектирования систем и средств обеспечения безопасности сложных систем рассматривались в рамках работы **четвертой секции** «Проблемы безопасности информационных технологий», которая, по-видимому, наиболее разнообразная по прикладной тематике представленных работ.

Весьма интересными представляются работы, в которых обсуждаются различные подходы и задачи обеспечения требуемого уровня информационной безопасности в процессе проектирования и эксплуатации автоматизированных систем различного класса и назначения. В этом плане можно выделить работы *Э.М. Мамедли* «Анализ специфики интерактивных ошибок в сложных информационно-управляющих системах крупных мегаполисов, регионов и международных корпораций», *Д.С. Сомова* «Информационная модель состояния и мониторинга сложных систем», *В.В. Муромцева* «Виртуальные коммуникации в задачах управления организационными системами», *Б.А. Мавлянкариева, А.А. Насырова, Б.Б. Хатамова, А.Ю. Пен, Т.Н. Кабышева, Б.М. Дильмагамбетовой, Т.К. Жумадиловой* «Процедура сравнения и выбора технических средств управления безопасностью сложных систем», *М.А. Стюгина* «Иммунная система информационной безопасности», *И.М. Панасенко, В.М. Ба-*

бикова «Распространение доверия в распределенных сенсорных сетях и во времени».

Традиционный интерес участников конференции вызвали работы, посвященные технологическим вопросам управления безопасностью сложных систем. В рамках данной тематики отметим доклады *В.В. Андреева*, *О.С. Лекшина* «Управление информационной безопасностью в слабо связанных информационных системах», *В.С. Кротова*, *И.С. Лебедева* «ИППУРКРИС-технология и ее применение в системах управления безопасностью сложных систем», *Л.А. Гайнанишина* «СИВЭСВАС-технология и ее применение в системах управления безопасностью сложных систем», *Е.А. Куклева* «КАПОРДИНС-технология и ее применение в системах управления безопасностью сложных систем», *В.С. Кротова* «ИНПОМИР-технология и ее применение в системах управления безопасностью сложных систем».

Доклады, представленные на **пятой секции**, посвящены рассмотрению социально-правовых аспектов и вопросов кадровой поддержки регионального и муниципального управления.

Достаточно интересна работа *П.Ю. Чеботарева*, *А.К. Логинова*, *Я.Ю. Цодиковой*, *З.М. Лезиной*, *В.И. Борзенко* «О конкуренции двух групп при голосовании в стохастической среде», посвященная исследованию социальной динамики, определяемой демократическими решениями в стохастической среде. Предмет исследования авторов состоит в определении аналитических зависимостей показателей социальной динамики от социальных установок участников, к числу которых могут относиться эгоизм, коллективизм (корпоративизм), альтруизм и др. В работе рассматривается так называемый механизм «снежного кома кооперации», позволяющий при определенных условиях побуждать участников процедур голосования, исходно имевших эгоистические установки, поступать в соответствии с альтруистическими принципами. Детально изучен специальный случай рассматриваемой ситуации — случай конкуренции двух групп голосующих.

Среди работ, посвященных юридическим аспектам организационного управления на региональном и муниципальном уровнях, отметим до-

клады *И.Н. Крапчатовой* «Особенности субъекта посягательств против порядка управления (на примере ст. 317 УК РФ)», *А.Г. Дороховой* «Некоторые вопросы экспертизы содержания прав на нежилые помещения», *А.А. Силаева* «Конституция Швейцарии: отношения между федеральным правительством и кантонами».

Комплекс проблем кадрового обеспечения рассмотрен в докладах *Г.М. Шамаровой* «Развитие профессионального потенциала руководящих кадров органов местного самоуправления», *Е.Ю. Славниковой* «Особенности процесса повышения конкурентоспособности промышленных предприятий на основе кадрового менеджмента на современном этапе», *Г.Е. Кедровой* «Web 2.0 как новая парадигма дистанционного обучения: к постановке проблемы», *Т.Б. Лисицыной*, *О.М. Цеханович* «Инновационные подходы к построению системы образования в условиях малого города (на примере Гжельской местности Московской области)», *И.Г. Лурье* «Использование превентивной технологии обучения при подготовке кадров в рамках специальности государственного и муниципального управления».

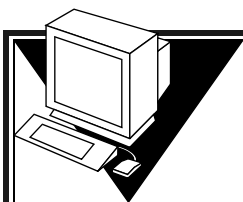
К сожалению, объективные ограничения на объем данной публикации не позволили сделать полноценный обзор и тем более раскрыть содержание всех представленных на конференции разнообразных по тематике и безусловно интересных докладов. Более подробно ознакомиться с представленными работами можно в опубликованных материалах конференции¹[1].

Ф.Ю. Чанхиева, А.Б. Шелков

Чанхиева Фарида Юсуповна — канд. техн. наук, Российский государственный гуманитарный университет, г. Москва, ☎(495) 250-64-28, ✉faridac@mail.ru,

Шелков Алексей Борисович — канд. техн. наук, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ☎(495) 334-89-59, ✉shelkov@ipu.ru.

¹ *Проблемы регионального и муниципального управления: Сб. докл. IV междунар. науч. конф. «Проблемы регионального и муниципального управления», Москва, 23 апреля 2009 г. — М.: РГГУ, 2009. — 331 с.*



Внимание!

Наш новый адрес в Интернете: <http://pu.mtas.ru>

Редакция



CONTENTS & ABSTRACTS

FINITE-FREQUENCY IDENTIFICATION: DYNAMIC ALGORITHM 2

Alexandrov A.G., Orlov Yu.F.

New algorithm of the finite—frequency identification of linear stable plant when the external disturbance is an unknown-but- bounded function is proposed. It allows to enhance identification accuracy. The algorithm convergence is proved.

Keywords: identification, linear system, frequency approach, unknown-but-bounded disturbance.

SUFFICIENT ROUGHNESS CONDITIONS OF NON-AUTONOMOUS NONLINEAR DYNAMIC SYSTEM IN THE SENSE OF STABILITY TYPE CONSERVATION. 9

Zhukov V.P.

The conditions under which the stability type of the equilibrium state of a Lyapunov-type random-order non-autonomous nonlinear dynamic system would not change under any relatively small linear or nonlinear perturbances of its right-hand member (roughness in the sense of stability type conservation) are considered. Nonlinear components of right-hand members of unperturbed system and nonlinear perturbances of those right-hand members are considered to belong to a wide class of nonlinear functions depending in general case not just on the phase variable but also on time. This class contains both analytic functions and various types of nonanalytic functions. Sufficient roughness conditions are derived.

Keywords: nonlinear dynamic system, roughness in the sense of stability type conservation.

IDENTIFICATION OF FUZZY SYSTEMS: METHODS AND ALGORITHMS 15

Hodashinsky I.A.

The paper considers three basic phases of fuzzy systems construction: expert evaluation, structure identification, parameter estimation. Expert evaluation includes: selection of fuzzy model type; choice of t -normal functions to set the fuzzy logic operations; choice of a fuzzy logic inference. For structure identification the fuzzy clustering method and iterative algorithm are offered. For parameters optimization the following methods have been chosen: genetic algorithm, ant colony algorithm, particle swarm optimization, simulated annealing.

Keywords: fuzzy system identification, metaheuristics, simulated annealing, genetic algorithm, ant colony algorithm, particle swarm techniques.

CORPORATE MODEL OF INTERESTS COORDINATION IN VIEW OF ECOLOGICAL FACTORS 24

Zolotova T.V.

The model of branch corporation control with restriction on scarce and natural resources is presented. The model describes the two-level hierarchical control system. The positive effect of corporation activity with ideal coordination of participants' (the operating company, the enterprises) interests is considered. Different variants of model are considered: with additional restriction on admissible level of environmental pollution; with quotas; and with system of penalties for excess of admissible level of pollution.

Keywords: corporation, ideal coordination, profit maximization, settlement prices, tariffs on scarce and natural resources, quotas, penalty.

OPTIMIZATION OF ECONOMIC ORGANIZATION ADAPTATION TO ENVIRONMENT CHANGES 32

Mikhnenko P.A.

Adaptation to changing external factors is a condition of successful work of any modern economic organization. In feedback organizational systems the intensity of organizational transformations depends on statistic characteristics of the environment factors and intensity of information uncertainty. Increase of uncertainty of environment involves either the necessity of decrease of transformations intensity or implementation of strategy of anticipatory adaptation.

Keywords: economic organization, adaptation, uncertainty, mathematical model, stochastic characteristics, intensity of transformations.

EVALUATION PROCEDURE OF AN INNOVATIVE PROJECTS PORTFOLIO INTEGRATED RISK. PART 2. METHODOLOGICAL FEATURES OF ESTIMATION OF AN INNOVATIVE PROJECTS PORTFOLIO INTEGRATED RISK. 39

Dyomkin I.V., Pertsev D.V.

On the basis of preconditions, studied in the first part of the paper, authors offer the original approach to solving the problem of integrated

risk estimation. Moreover, the paper proposes new method of project portfolio integrated risk estimation with allowance for synergy and cannibalization effects.

Keywords: portfolio, innovative project, model, synergy, cannibalization, risk.

IMPROVEMENT OF OPERATION ALGORITHMS OF FLOW-MEASURING CONTOURS OF A LAUNCH VEHICLE CONTROL SYSTEM. 46

Andrienko A.Ya., Losev G.P., Tropova E.I.

The paper gives recommendations on perfection of operation algorithms of flow-measuring contours of a propellant-consumption control system of the launch vehicle «Sojuz-2», providing suppression of residual occurrences of self-oscillations in operation of these contours.

Keywords: self-oscillations, flow-measuring contour, fuel consumption control system, launch vehicle.

THE SOFTWARE TOOL RDS (RESEARCH OF DYNAMIC SYSTEMS) FOR SIMULATION AND DEVELOPMENT OF CONTROL SYSTEMS 52

Dorri M.Kh., Roschin A.A.

The features of Software Tool RDS (Research of Dynamic Systems) are considered. It simplifies the development of research desks that are used for simulation and design of control systems for multi-purpose objects. RDS helps to synthesize algorithms of control and investigate the interaction between subsystems during dynamic processes.

Keywords: software tool, simulation, algorithms of control.

MODELLING OF KNOWLEDGE FOR RESEARCH OF UNIQUE OBJECT TECHNICAL STATE DYNAMICS 58

Nikolaychuk O.A.

The models of knowledge representation are developed and the further application of these models for solution of problems of genesis, forecasting and decision-making during the process of investigation of unique objects technical state dynamics is shown. As a result of a combination of case, production, and mathematical approaches, the hybrid model of knowledge representation, developed with an allowance for restrictions imposed by problem and subject areas is achieved. The algorithm of knowledge processing which uses the given hybrid representation is offered.

Keywords: models of knowledge representation, precedent, production, knowledge processing, unique mechanical system.

INVESTIGATION OF QUALITY MEASURES FOR SPEECH RECOGNITION SYSTEMS 66

Saakian A.A.

The paper considers the problem of selection of appropriate quality measures for characterizing the efficiency of complex system that is investigated experimentally. The paper considers one kind of such systems — speech recognition systems and suggests the requirements for quality measures for speech systems. The paper also describes the principles of experimental investigation of quality measures and the results of experiments that allow selecting the best quality measure from the given set.

Keywords: speech recognition, recognition algorithm, quality coefficient, quality measurement.

HIERARCHICAL ADAPTIVE IMAGE SEGMENTATION 74

Agaronyan O.S.

The problem of the hierarchical segmentation of an image based on irregular pyramid is considered. An adaptive approach using Voronoi diagram and Delaunay graph is proposed for image modeling. To derive many segmentations at different resolutions an iterative procedure is presented.

Keywords: hierarchical image model, irregular pyramid, image segmentation, mosaic tessellation, Voronoi diagram, Delaunay graph.

THE ALL-RUSSIAN SEMINAR «MODERN METHODS OF NAVIGATION AND MOTION CONTROL: INFORMATION-CONTROL SYSTEMS OF AUTONOMOUS MOVING OBJECTS» 80

IV INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE «THE PROBLEMS OF REGIONAL AND MUNICIPAL MANAGEMENT» 83



IX международная конференция «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта» (CAD/CAM/PDM—2009)

Уважаемые коллеги!

Приглашаем вас принять участие в конференции, которая состоится 20—22 октября 2009 г. в Москве, в Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН.

ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ

- ✓ Организация структур технических и программных средств проектирования и управления. Средства взаимодействия, структуры данных, международные стандарты.
- ✓ Компьютерная графика и CAD/CAM/PDM-системы в учебных процессах (программы обучения по дисциплинам, методические материалы, тестирование). Средства виртуальной реальности в промышленных системах.
- ✓ Интегрированные производственные системы и управление технологическими процессами. PDM-системы.
- ✓ Проектирование в машиностроении и строительстве.
- ✓ Проектирование в радиоэлектронике.

ОРГАНИЗАТОРЫ

- Российская академия наук.
- Министерство образования и науки РФ.
- Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН.
- Международная академия информатизации.
- Государственный космический научно-производственный центр им. М.В. Хруничева.
- Московский технический университет связи и информатики.
- Ракетно-космическая корпорация «Энергия».
- Американский благотворительный фонд поддержки информатизации образования и науки.
- МГТУ «Станкин».

КЛЮЧЕВЫЕ ДАТЫ

До 25 сентября 2009 г. — заявка на участие в конференции и/или выставке, перевод оргвзноса, тезисы докладов не более одной страницы формата А5.

До 1 октября 2009 г. — полные тексты докладов.

Заявки, тезисы и доклады высылаются по электронной почте ✉ conf18@spm.ipu.ru.

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ (формы заявок, правила оформления докладов и др.):

<http://lab18.ipu.rssi.ru>.

ЯЗЫКИ КОНФЕРЕНЦИИ: русский, английский.

ОРГКОМИТЕТ

117997, Россия, г. Москва, Профсоюзная ул., 65, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Оргкомитет конференции CAD/CAM/PDM—2009.

☎ (495) 334-93-50; ☎ (495) 334-91-29.

Председатель: д-р техн. наук, профессор Артамонов Евгений Иванович.

Учёный секретарь: канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник Смирнов Сергей Владимирович.