



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. Пашенко

Редактор

Т.А. Гладкова

Выпускающий редактор

Л.В. Петракова

Издатель

ООО «СенСидат-Контрол»

Адрес редакции
117997, ГСП-7, Москва,
ул. Профсоюзная, д. 65, к. 272.
Тел./факс (495) 334-92-00

E-mail: pu@ipu.ru
www.ipu.ru/period/pu

Оригинал-макет
и электронная версия
подготовлены
ООО «ЭЛЕКТРОНИНФОРМ»

Отпечатано с готовых диапозитивов
в типографии ГКС

Подписано в печать
15.01.2007 г.

Заказ № PB107

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 ВАК
(редакция октябрь—декабрь 2006 г.)

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

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

1.2007

СОДЕРЖАНИЕ

Анализ и синтез систем управления

- Еремин Е. Л., Капитонова М. С. Адаптивная система управления T -периодическими нелинейными объектами 2
Погорелов В. А. Об управлении объектом с априорно неопределенной структурой вектора состояния 8

Математические проблемы управления

- Бурков В. Н., Буркова И. В., Колесников П. А., Кашенков А. Р. Структурно-эквивалентные функции в задачах дискретной оптимизации 13
Клещев А. С. Модель аналогии между математическими доказательствами 20

Управление в социально-экономических системах

- Цыганов В. В., Бухарин С. Н., Васин В. В. Интеллектуальные механизмы информационных войн. 25
Конюненко А. Ф., Шевченко В. В. Сценарное планирование как инструмент решения задач экономического управления 31
Дранко О. И. Модель финансового прогнозирования и сценарии внутренних инвестиций 37
Романов В. С. Задача управления стоимостью компании: дискретный случай 41

Управление технологическими процессами

- Кузнецов Л. А., Корнеев А. М., Журавлева М. Г. Идентификация статистических моделей технологических процессов с заполнением пропусков в данных. 46
Генкин А. Л., Куделин А. Р. Проблемы энергосберегающего управления листопрокатным комплексом. Ч. II 51

Управление в медико-биологических системах

- Хуторская О. Е. Автоматизированная система ранней и дифференциальной диагностики клинических форм болезни Паркинсона 58

Управление подвижными объектами

- Макаренко В. Г., Подорожник А. А., Рудаков С. В., Богомолов А. В. Инерциально-спутниковая навигационная система управления транспортными средствами 64

Краткие сообщения

- Клепарский В. Г., Клепарская Ек. В. Бифуркационные изменения адекватности управления энергетическими компаниями в процессе реформирования 72
Овсянникова Г. В. Модели оптового рынка электроэнергии в планировании деятельности энергетических предприятий в условиях реформирования электроэнергетики 74
Гладков М. Ю. Разработка механизмов привлечения фондами финансовых средств для реализации культурных, социальных и образовательных программ . . . 76

Хроника

- VI Международная научно-техническая конференция «Интеллектуальные системы» (AIS'06). XXI Международная научно-техническая конференция «Интеллектуальные САПР» (CAD — 2006). 79

* * *

- Contents & abstracts 83

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ T -ПЕРИОДИЧЕСКИМИ НЕЛИНЕЙНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Е. Л. Еремин, М. С. Капитонова

Амурский государственный университет, г. Благовещенск

Рассмотрена задача синтеза адаптивной системы управления для нелинейных периодических скалярных объектов с применением неявной эталонной модели и метода синтеза, основанного на применении критерия гиперустойчивости. Структура контуров самонастройки коэффициентов адаптивного регулятора формируется как с помощью периодических, так и интегрирующих блоков.

ВВЕДЕНИЕ

В современных технических системах важную роль играют периодические (с той или иной степенью повторяемости) процессы, например, циклические режимы механических систем типа промышленных роботов, режимы работы металлообрабатывающих станков с программным управлением, производящих серию одинаковых деталей, и др. На каждом цикле работы, как правило, системы управления подвержены действию помех, проявляющихся практически одинаково (циклические возмущения).

Таким образом, среди множества систем автоматического управления различного назначения можно выделить класс систем, у которых задающие и возмущающие воздействия представляют собой некоторые сигналы постоянного периода T , основная задача управления в таких T -периодических системах обычно сводится к минимизации ошибки управления.

Для решения одной из подобных задач предлагалось использовать «модифицированную следящую систему с памятью (ССП) в цепи обратной связи» или так называемую систему управления циклического действия [1, 2]. Отличительная особенность таких систем управления состоит в наличии в ней внутреннего контура с положительной обратной связью и блоком запаздывания в контуре, благодаря которому система как бы «приспосабливается» к периодическим как задающим, так и возмущающим воздействиям. Указанная задача была решена для асимптотически устойчивых стационарных линейных систем с известными параметрами, в которых передаточная функция объекта управления удовлетворяла требованиям вещественности и положительной определенности.

Решение аналогичной задачи построения непрерывных и дискретных периодических систем управления рассматривалось, соответственно, в работах [3, 4], где при наличии периодических возмущений был осуществлен синтез систем на основе принципа внутренней модели, т. е. путем введения в основной контур управления генератора периодических сигналов. Такая схема получила название повторяющегося управления (repetitive control) или P -интегратора. Данный метод стабилизации возмущений получил развитие в работе [5], где описаны результаты разработки и внедрения самообучающихся электроприводов подачи токарных станков для финишной обработки деталей.

Зачастую управление происходит в условиях существенной нестационарности и нелинейности динамических характеристик объекта управления, вследствие чего качество процесса управления может ухудшиться или вообще произойти потеря устойчивости. В таких случаях целесообразно применять методы адаптивного или робастного управления, позволяющие сохранить работоспособность систем при наличии априорной неопределенности, нелинейности и нестационарности в объекте управления.

В настоящей работе рассмотрен один из возможных вариантов построения беспоисковых систем прямого адаптивного управления для нелинейно-нестационарного T -периодического объекта. Метод решения данной задачи основан на применении специального типа алгоритмов параметрической настройки адаптивных регуляторов [6]. Структура контура самонастройки выбирается подобно структуре регулятора, рассмотренного в работах [1, 2, 7], а синтез системы управления циклического действия опирается на критерий гиперустойчивости В. М. Попова, т. е. связан с построением устойчивых в целом нелинейных систем управления первого типа [8].



1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ

Рассматривается нелинейный нестационарный SISO-объект (single input—single output, т. е. объект с одним входом и одним выходом или скалярный объект), динамика которого описывается уравнениями

$$\frac{dx(t)}{dt} = A(t, x)x(t) + B(t)u(t) + f(t),$$

$$y(t) = g^T x(t),$$

где $x(t) \in R^n$ — вектор состояний; $u(t) \in R$ — скалярное управление; $y(t) \in R$ — скалярный выход, образованный вектором $g^T = (g_1, g_2, \dots, g_n)$; $f^T(t) = f^T(t + T) = (0, \dots, 0, f_n(t))$ — вектор возмущений, $|f_n(t)| \leq \text{const}$; $A(t, x)$ — нелинейная нестационарная матрица; $B(t) = B(t + T)$ — нестационарный T -периодический вектор вида

$$B(t) = B_*(1 + \rho(t)) = B_*(1 + \rho(t + T)),$$

$$|\rho(t)| < 1, \quad T = \text{const} > 0,$$

где вектор $B_*^T = (0, \dots, 0, 1)$; $\rho(t) = \rho(t + T)$ — скалярная функция.

Предполагается, что матрица $A(t, x)$ представима следующим образом:

$$A(t, x) = A_* + \tilde{A}(t, x), \quad A_* = A_0 + \chi_0 B_* g^T,$$

$$\tilde{A}(t, x) = B_* \vartheta^T(t, x),$$

$$\vartheta^T(t, x) = (\delta_1(t)\phi_1(x_1(t), \dots, x_n(t)), \dots, \delta n(t)\phi_n(x_1(t), \dots, x_n(t))),$$

$$|\delta_i(t)| \leq \delta_{0i}^2 = \text{const}, \quad i = \overline{1, n},$$

где A_* — стационарная матрица; A_0 — гурвицева матрица; $\chi_0 = \text{const} < 0$ — скалярная величина; $\tilde{A}(t, x)$ — матрица, элементы которой являются произведениями функций $\delta_i(t) = \delta_i(t + T)$ и функционалов $\phi_i(x_1(t), \dots, x_n(t))$, $i = \overline{1, n}$. Это позволяет исходный объект эквивалентно преобразовать к виду

$$\frac{dx(t)}{dt} = A_0 x(t) + B_*(1 + \rho(t))u(t) + (1 + \rho(t)) \times$$

$$\times (\chi_0 g^T + \tilde{\vartheta}^T(t, x))x(t) + f_n(t),$$

$$\tilde{\vartheta}^T(t, x) = \frac{\vartheta(t, x) - \chi_0 g \rho(t)}{1 + \rho(t)}, \quad y(t) = g^T x(t), \quad (1)$$

а условия априорной неопределенности, в которых он функционирует, описать соотношениями

$$A_* = (A_*)_\xi, \quad g = g_\xi, \quad \rho(t) = \rho_\xi(t), \quad \vartheta(t, x) = \vartheta_\xi(t, x),$$

$$f(t) = f_\xi(t), \quad \xi \in \Xi, \quad (2)$$

где ξ — набор всех неизвестных параметров; Ξ — известное множество возможных значений ξ .

Пусть элементы вектора состояний объекта доступны измерению, тогда структуру адаптивного регулятора можно задать уравнениями

$$u(t) = k v(t) - \chi^T(t)x(t), \quad \chi(t) = \chi_{\text{инт}}(t)g + \chi_{\text{пер}}(t), \quad (3)$$

где $k = \text{const} > 0$ — скалярная величина; $\chi(t) \in R^n$ — вектор коэффициентов настройки контура адаптации; $\chi_{\text{инт}}(t) \in R$ и $\chi_{\text{пер}}(t) \in R^n$ — соответственно, интегральная

и периодическая составляющие; $v(t)$ — выход генератора периодических сигналов вида

$$v(t) = v(t - T) + z(t), \quad (4)$$

на вход которого подается рассогласование

$$z(t) = r(t) - y(t), \quad (5)$$

где $r(t) = r(t + T) \in R$ — задающее воздействие.

Желаемая динамика в системе (1)—(5), аналогично [9], формируется уравнениями строго минимально-фазовой неявной эталонной модели:

$$\frac{dx_*(t)}{dt} = A_0 x_*(t) + B_* k v_*(t) + f(t),$$

$$y_*(t) = g^T x_*(t) = r(t) = r(t + T), \quad (6)$$

$$v_*(t) = v_*(t + T).$$

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для замкнутой системы управления (1), (3)—(5) с эталоном (6), функционирующей в условиях априорной неопределенности (2), требуется определить явный вид алгоритмов настройки $\chi_{\text{инт}}(t)$ и $\chi_{\text{пер}}(t)$ таким образом, чтобы при любых начальных условиях $x(0)$, $\chi_{\text{пер}}(0)$, $\chi_{\text{инт}}(0) = 0$, обеспечивалось выполнение как цели управления

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (r(t) - y(t)) = \lim_{t \rightarrow \infty} (y_*(t) - y(t)) = 0, \quad (7)$$

так и целей адаптации

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \chi_{\text{инт}}(t) = \chi_{\text{инт}}^* = \text{const},$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \chi_{\text{пер}}(t) = \chi_{\text{пер}}^* = \chi_{\text{пер}}^*(t + T). \quad (8)$$

3. МЕТОД РЕШЕНИЯ

При разработке адаптивной системы управления будем опираться на критерий гиперустойчивости, в соответствии с которым устойчивость нелинейной системы управления в целом рассматривается как следствие, вытекающее из свойств ее составных частей. А именно, из требований вещественности и положительности передаточной функции линейной стационарной части системы (ЛСЧ) и условий разрешимости интегрального неравенства В. М. Попова (ИНП) для ее нелинейной нестационарной части (ННЧ). При синтезе алгоритмов адаптации системы управления будем следовать методике, изложенной в работе [10].

На первом этапе, если ввести в рассмотрение вектор рассогласования состояний объекта управления и эталонной модели $e(t) = x_*(t) - x(t)$, то в результате соответствующих преобразований уравнений системы управления (1), (3)—(5) и (6) можно получить ее эквивалентное математическое описание в виде

$$\frac{de(t)}{dt} = A_0 e(t) + B_* \mu(t), \quad z(t) = y_*(t) - y(t) = g^T e(t), \quad (9)$$

$$\mu(t) = -k((1 + \rho(t))v(t) - v_*(t)) + (1 + \rho(t))(\chi_{\text{пер}}(t) -$$

$$- \tilde{\vartheta}(t, x))^T x(t) + (1 + \rho(t))(\chi_{\text{инт}}(t) - \chi_0)u(t), \quad (10)$$

где $z(t)$ — эквивалентный выход, $\mu(t)$ — видоизмененное управление. В полученной форме записи соотношения

(9) описывают ЛСЧ исследуемой системы, а выражение (10) — ее ННЧ.

На *втором этапе* требуется решить проблему вещественности и строгой положительности ЛСЧ системы, рассматриваемую относительно ее передаточной функции

$$W_{\text{ЛСЧ}}(s) = kg^T(sE - A_0)^{-1}B_* = \frac{kg^T(sE - A_0)^+ B_*}{\det(sE - A_0)},$$

где $(sE - A_0)^+$ — присоединенная матрица матрицы $(sE - A_0)$.

Известно [9, 10], что передаточная функция $W_{\text{ЛСЧ}}(s)$ обладает свойствами положительности и вещественности, т. е. удовлетворяет частотному условию

$$\operatorname{Re} W_{\text{ЛСЧ}}(j\omega) > 0, \quad \forall \omega \geq 0,$$

в частности, тогда, когда при достаточно большом значении $|\chi_0|$, существует такой вектор g , что числитель передаточной функции ЛСЧ, т. е. полином $g^T(sE - A_0)^+ B_*$, — гурвицев степени $(n - 1)$ с положительными коэффициентами. Будем полагать, что для объекта (1) вектор g удовлетворяет указанным условиям, и поскольку, как будет показано далее, в процессе самонастройки всегда найдется требуемое значение скалярной величины χ_0 , то можно считать требование положительности и вещественности $W_{\text{ЛСЧ}}(s)$ выполненными.

На *третьем этапе* необходимо выполнить ИНП, общий вид которого можно описать соотношением

$$\eta(0, t) = - \int_0^t \mu(s)z(s)ds \geq -\gamma^2, \quad \gamma^2 = \text{const}, \quad \forall t > 0, \quad (11)$$

т. е. обеспечить выполнение указанного неравенства путем определения явного вида алгоритмов самонастройки ки адаптивного регулятора.

Для получения указанной оценки осуществим ряд действий: прежде всего, опираясь на эквивалентную систему (9), (10), приведем интеграл в левой части ИНП (11) к следующему виду:

$$\begin{aligned} \eta(0, t) &= - \int_0^t \mu(s)z(s)ds = \eta_1(0, t) + \eta_2(0, t) + \eta_3(0, t) = \\ &= k \int_0^t (1 + \rho(s))(v(s) - \tilde{v}(s))z(s)ds - \int_0^t (1 + \rho(s)) \times \\ &\quad \times (\chi_{\text{пер}}(s) - \tilde{\Theta}(s, x))^T x(s)z(s)ds - \\ &\quad - \int_0^t (1 + \rho(s))(\chi_{\text{инт}}(s) - \chi_0)y(s)z(s)ds, \end{aligned}$$

где $\tilde{v}(t) = \tilde{v}(t + T)$ — некоторая периодическая функция

$$\text{вида } \tilde{v}(t) = \frac{v_*(t)}{1 + \rho(t)}.$$

Далее покажем, что, путем синтеза алгоритмов настройки параметров $\chi(t)$ и $v(t)$ в виде

$$v(t) = v(t - T) + z(t), \quad (12)$$

$$\chi_{i\text{пер}}(t) = \chi_{i\text{пер}}(t - T) - \beta_{2i}x_i(t)z(t), \quad (13)$$

$$\frac{d\chi_{\text{инт}}(t)}{dt} = -\beta_1 y(t)z(t), \quad (14)$$

где $\beta_1, \beta_{2i} = \text{const} > 0, v(s) = 0, \chi_{i\text{пер}}(s) = 0, s \in [-T, 0], i = \overline{1, n}$ будут выполнены следующие неравенства:

$$\begin{aligned} \eta_1(0, t) &= k \int_0^t (1 + \rho(s))(v(s) - \tilde{v}(s))z(s)ds \geq -\gamma_0^2, \\ \eta_2(0, t) &= \\ &= - \int_0^t (1 + \rho(s))(\chi_{\text{пер}}(s) - \tilde{\Theta}(s, x))^T x(s)z(s)ds \geq -\gamma_1^2, \quad (15) \\ \eta_3(0, t) &= - \int_0^t (1 + \rho(s))(\chi_{\text{инт}}(s) - \chi_0)y(s)z(s)ds \geq -\gamma_2^2, \end{aligned}$$

где $\gamma_0^2 + \gamma_1^2 + \gamma_2^2 = \gamma^2 = \text{const}$.

Действительно, с учетом выражения (14), слагаемое $\eta_3(0, t)$ можно преобразовать к виду

$$\begin{aligned} \eta_3(0, t) &= \frac{1}{2} \beta_2^{-1} (1 + \rho(t))(\chi_{\text{инт}}(t) - \chi_0)^2 - (\chi_{\text{инт}}(0) - \chi_0)^2 \geq \\ &\geq -\frac{1}{2} \beta_2^{-1} (\chi_{\text{инт}}(0) - \chi_0)^2 = -\gamma_2^2 = \text{const}, \quad \forall t > 0. \end{aligned}$$

Для оценки слагаемых $\eta_1(0, t)$ и $\eta_2(0, t)$, докажем

Утверждение. Если динамический контур задан уравнением

$$v(t) = v(t - T) + \psi(t), \quad v(s) = 0, \quad s \in [-T, 0], \quad (16)$$

то для интегральной связи между его входом $\psi(t)$ и выходом $v(t)$ справедлива следующая оценка:

$$\eta_0(0, t) = \int_0^t \varphi(s)(v(s) - v_0(s))\psi(s)ds \geq -\gamma_0^2 = \text{const}, \quad (17)$$

$$\forall t > 0,$$

где $\varphi(t) > 0$ и $v_0(t) = v_0(t - T)$ — некоторые скалярные T -периодические функции.

Доказательство приведено в Приложении.

Таким образом, для $\eta_1(0, t)$ и $\eta_2(0, t)$ можно записать следующие неравенства:

$$\begin{aligned} \eta_1(0, t) &= k \int_0^t (1 + \rho(s))z(s) \left(\int_0^s \omega_0(s - h)r(h)z(h)dh - \tilde{v}(s) \right) ds \geq \\ &\geq -\gamma_0^2 = \text{const}, \quad \forall t > 0, \\ \eta_2(0, t) &= \sum_{i=1}^n \beta_{1i} \int_0^t (1 + \rho(s))x_i(s)z(s) \left(\int_0^s \omega_0(s - h)v_i(h)z(h)dh - \right. \\ &\quad \left. - \tilde{\Theta}(s, x) \right) ds \geq - \sum_{i=1}^n \gamma_{1i}^2 = -\gamma_1^2 = \text{const}, \quad \forall t > 0. \end{aligned}$$

Очевидно, что справедливость соотношений (15) непосредственно подтверждает справедливость ИНП вида (11).

На *четвертом этапе*, в условиях априорной неопределенности (2), требуется проверить достижимость в системе (1)–(6), (12)–(14) целевых условий вида (7), (8), т. е. ее адаптивности в заданном классе Э.

Поскольку требования критерия гиперустойчивости на втором и третьем этапах синтеза системы управления были выполнены, то, аналогично работе [10], это означает асимптотическую гиперустойчивость как эквива-



лентной системы (9), (10), (12)—(14), так и исходной системы (1)—(6), (12)—(14). Таким образом, для системы управления (9), (10), (12)—(14) имеет место существование предельного соотношения

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} (x, (t) - x(t)) = 0,$$

и, как следствие, достижимость цели управления (7) в системе (1)—(6), (12)—(14).

Учитывая существование целевого условия (7), становится очевидным и выполнение целей адаптации (8). Действительно, в условиях (8), согласно выражениям (5), (7) и (13), будет выполнено второе предельное соотношение, а, учитывая выражения (5), (7), (14) и очевидное предельное соотношение

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{d\chi_{\text{инт}}(t)}{dt} = 0, \quad (18)$$

будет достижимо и первое предельное соотношение.

Учитывая, что выполнение целевых условий (7) и (8) имеет место при любом наборе $\xi \in \Xi$, то систему (1)—(6), (12)—(14) можно считать адаптивной в заданном классе Ξ .

Отметим, что по окончании процесса самонастройки коэффициента $\chi_{\text{инт}}(t)$, согласно соотношению (18), всегда найдется такое значение χ_0 , что его модуль будет таким большим, как этого требует второй этап синтеза.

Итак, аналитическая стадия проектирования адаптивной системы управления завершена, что позволяет приступить к одному из *ключевых этапов* ее создания — имитационному моделированию или вычислительному эксперименту. При этом обычно осуществляется подбор числовых значений тех параметров контура адаптации, размер которых может быть задан и влияет на качество функционирования системы в условиях априорной неопределенности.

4. ПРИМЕР

В качестве примера рассмотрим задачу управления системой (1)—(6), (12)—(14) со следующими матрицей и векторами:

$$A(t, x) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ a_{51}(t, x) & a_{52}(t, x) & a_{53}(t, x) & a_{54}(t, x) & a_{55}(t, x) \end{pmatrix};$$

$$B(t) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ b_5(t) \end{pmatrix}; \quad f(t) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ f_5(t) \end{pmatrix},$$

где

$$\begin{aligned} a_{51}(t, x) &= a_1 + \phi_1(x_1, x_2, \dots, x_5)\delta_1(t), \\ a_{52}(t, x) &= a_2 + \phi_2(x_1, x_2, \dots, x_5)\delta_2(t), \\ a_{53}(t, x) &= a_3 + \phi_3(x_1, x_2, \dots, x_5)\delta_3(t), \end{aligned}$$

$$a_{54}(t, x) = a_4 + \phi_4(x_1, x_2, \dots, x_5)\delta_4(t),$$

$$a_{55}(t, x) = a_5 + \phi_5(x_1, x_2, \dots, x_5)\delta_5(t);$$

$$\phi_i(x_1, x_2, \dots, x_5) = h_1^{s_1} x_2^{s_2} x_3^{s_3} x_4^{s_4} x_5^{s_5}, \quad i = \overline{1, 5};$$

$$\delta_1(t) = c_1 \sin p t; \quad \delta_2(t) = c_2 \sin p t; \quad \delta_3(t) = c_3 \sin p t;$$

$$\delta_4(t) = c_4 \sin p t; \quad \delta_5(t) = c_5 \sin p t;$$

$$b_5(t) = 1 + b \sin p t; \quad f_5(t) = d e^{l \sin p t} - m;$$

$$g^T = (g_1 g_2 g_3 g_4 g_5).$$

Для имитационного моделирования значения указанных параметров выбирались произвольным образом из заданных диапазонов:

$$4 \leq a_1 \leq 7; \quad -2 \leq a_2 \leq -0,2; \quad 10 \leq a_3 \leq 17;$$

$$-8 \leq a_4 \leq -4; \quad -4,5 \leq a_5 \leq 1;$$

$$100 \leq h \leq 350; \quad 0 \leq s_i \leq 3; \quad i = \overline{1, 5};$$

$$24 \leq c_1 \leq 37; \quad -0,5 \leq c_2 \leq 2; \quad 15 \leq c_3 \leq 25;$$

$$8 \leq c_4 \leq 16; \quad -0,5 \leq c_5 \leq 1;$$

$$0 < b < 1; \quad 0,1 \leq p \leq 2; \quad 0 < d \leq 1,5; \quad 0,1 \leq l \leq 2;$$

$$0 \leq m \leq 2;$$

$$1 \leq g_1 \leq 4; \quad 0,1 \leq g_2 \leq 2; \quad 5 \leq g_3 \leq 10; \quad 0,4 \leq g_4 \leq 1;$$

$$0,1 \leq g_5 \leq 0,5.$$

В частности, один из вычислительных экспериментов проводился при наборе данных:

$$a_1 = 6, \quad a_2 = -0,5, \quad a_3 = 11, \quad a_4 = -5, \quad a_5 = -2;$$

$$h = 300, \quad \phi_1 = 300 x_1^2 x_4 x_5, \quad \phi_2 = 300 x_1^2 x_4^2 x_5^2,$$

$$\phi_3 = 300 x_1 x_3^2 x_4 x_5, \quad \phi_4 = x_1 x_3 x_4 x_5, \quad \phi_5 = 300 x_5,$$

$$c_1 = 30, \quad c_2 = 1,5, \quad c_3 = 25, \quad c_4 = 15, \quad c_5 = 0,5,$$

$$b = 0,8, \quad p = 0,5, \quad d = 0,1, \quad l = 1, \quad m = 0,3,$$

$$g_1 = 1, \quad g_2 = 0,2, \quad g_3 = 5, \quad g_4 = 0,5, \quad g_5 = 0,2.$$

Задающее воздействие $r(t)$ формировалось в виде функции:

$$r(t) = 0,2(e^{0,5(1 - \cos 2\pi t)} - 1) - 0,2(1 - \cos \pi t),$$

а начальные условия были следующими:

$$x(0) = 0, \quad \chi_{\text{инт}}(0) = 0, \quad \chi_{\text{пер}}(0) = 0.$$

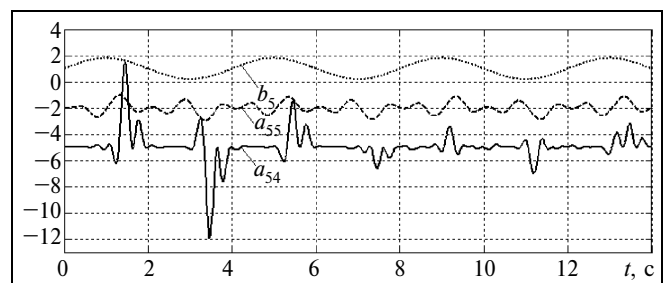


Рис. 1. Изменения параметров $a_{54}(t, x)$, $a_{55}(t, x)$ и $b_5(t)$ в объекте управления

В ходе нескольких сеансов имитационного моделирования были выбраны следующие значения числовых параметров контура управления:

$$\beta_{11} = 2000; \beta_{12} = 2000; \beta_{13} = 1800; \beta_{14} = 800; \\ \beta_{15} = 200; \beta_2 = 1000; k = 1000.$$

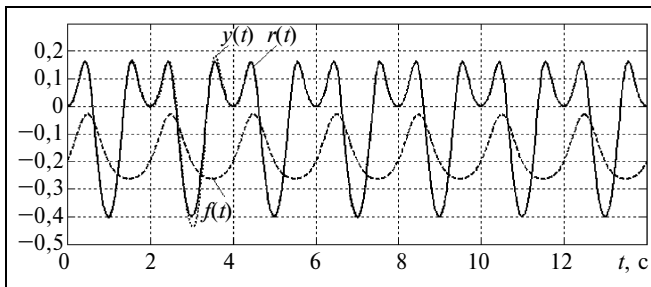


Рис. 2. Задающее воздействие $r(t)$ и выход объекта управления $y(t)$ при постоянно действующем возмущении $f(t)$

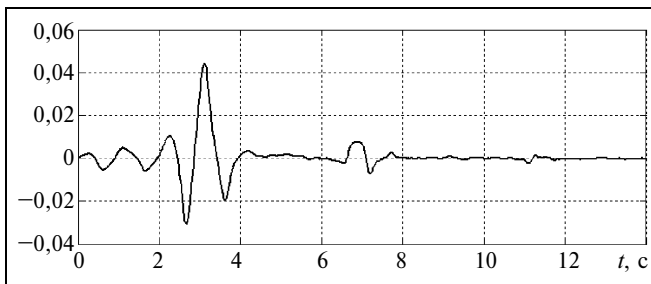


Рис. 3. Динамика изменения ошибки $r(t) - y(t)$

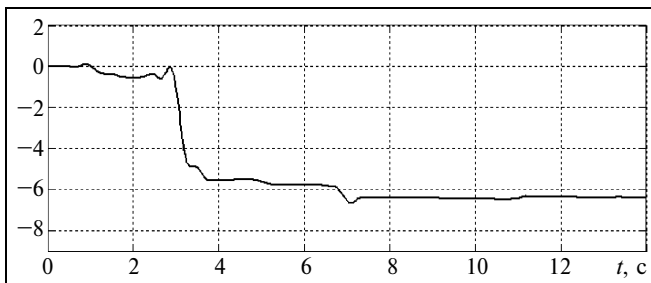


Рис. 4. Процесс настройки параметра $\chi_{\text{инт}}(t)$

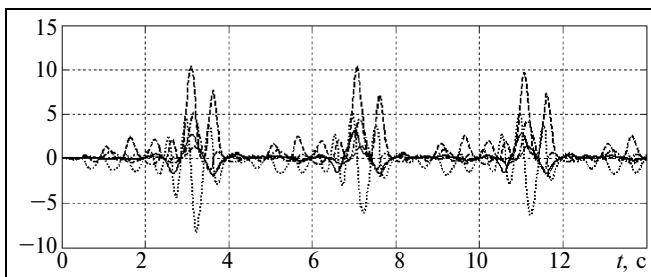


Рис. 5. Процесс настройки параметра $\chi_{\text{пер}}(t)$

Некоторые динамические процессы в исследуемой системе показаны на рис. 1–5.

В качестве средства компьютерного моделирования использовался пакет Simulink программной среды MATLAB.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен способ построения системы управления нелинейными T -периодическими скалярными объектами. В отличие от известных структур систем управления циклического действия предлагаемый контур адаптации наряду с периодическими содержит и интегрирующий блоки настройки. Это позволяет обеспечить асимптотическую устойчивость системы управления и, как показывают результаты имитационного моделирования, достаточно хорошее качество ее функционирования.

Предложенный способ построения адаптивной системы управления может применяться и для решения задач управления динамическими SISO-объектами в тех случаях, когда переменные состояния не доступны измерению. При этом, аналогично работе [11], достаточно в основной контур управления ввести дополнительный фильтр для получения оценок переменных состояния объекта.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Доказательство утверждения. Запишем уравнение (16) по Лапласу и определим его передаточную функцию

$$W_0(s) = \frac{v(s)}{\psi(s)} = \frac{1}{1 - \exp(-sT)}, \quad (\text{П.1})$$

которой соответствует импульсная переходная характеристика

$$w_0(t) = \sum_{i=0}^{\infty} \delta(t - iT), \quad (\text{П.2})$$

где $\delta(t - iT)$ — функция Дирака.

Действительно,

$$\begin{aligned} W_0(s) &= \int_0^{\infty} w_0(t) \exp(-st) dt = \int_0^{\infty} \sum_{i=0}^{\infty} \delta(t - iT) \exp(-st) dt = \\ &= \sum_{i=0}^{\infty} \left(\int_0^{\infty} \delta(t - iT) \exp(-st) dt \right) = \sum_{i=0}^{\infty} \left(p \int_0^{\infty} 1(t - iT) \exp(-st) dt \right) = \\ &= \sum_{i=0}^{\infty} \exp(-isT) = \frac{1}{1 - \exp(-sT)}. \end{aligned} \quad (\text{П.3})$$

Тогда, с учетом выражений (П.1)–(П.3), уравнение (16) можно переписать в виде

$$v(t) = \int_0^t w(t-s) \psi(s) ds,$$

а в левой части неравенства (17) представить интеграл следующим образом:

$$\eta_0(0, t) = \int_0^t \varphi(s) \psi(s) \left(\int_0^s w_0(s-h) \psi(h) dh - v_*(s) \right) ds. \quad (\text{П.4})$$

Принимая во внимание периодичность функции $v_*(t) = v_*(t - T)$, построим ее изображение. Поскольку период $v_*(t)$ равен T , то с помощью некоторой функции $\psi_*(t)$, совпадающей с $v_*(t)$ на интервале $(0, T)$ и равной нулю вне этого ин-



тервала, процесс формирования сигнала $v_*(t)$ можно описать уравнениями

$$v_*(t) = v_*(t - T) + \psi_*(t), \quad T = \text{const} > 0, \quad v_*(s) = 0, \quad s \in [-T, 0],$$

$$\psi_*(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0, \\ v_*(t), & t \in (0, T), \\ 0, & t \geq T, \end{cases}$$

а его изображение определить в виде

$$v_*(s) = \frac{1}{1 - \exp(-sT)} \psi_*(s) = W_0(s)\psi_*(s). \quad (\text{П.5})$$

При этом, аналогично соотношению (П.2), для уравнения (П.5) будет справедливо равенство

$$v_*(t) = \int_0^t w_0(t-s)\psi_*(s)ds. \quad (\text{П.6})$$

Теперь, опираясь на соотношение (П.5), выполним для интеграла (П.4) эквивалентные преобразования:

$$\begin{aligned} \eta_0(0, t) &= \int_0^t \varphi(s)\psi(s) \left(\int_0^s w_0(s-h)\psi(h)dh - v_*(s) \right) ds = \\ &= \int_0^t (\psi(s) - \psi_*(s)) \int_0^s w_0(s-h)(\psi(h) - \psi_*(h))dh ds + \\ &\quad + \int_0^t \psi_*(s) \int_0^s w_0(s-h)(\psi(h) - \psi_*(h))dh ds. \end{aligned} \quad (\text{П.7})$$

С учетом явного вида функции $\psi_*(t)$, второй интеграл в правой части выражения (П.7) можно представить в эквивалентной форме записи:

$$\begin{aligned} &\int_0^t \varphi(s)\psi_*(s) \int_0^s w_0(s-h)(\psi(h) - \psi_*(h))dh ds = \\ &= \int_0^T \varphi(s)\psi_*(s) \int_0^s w_0(s-h)(\psi(h) - \psi_*(h))dh ds, \end{aligned} \quad (\text{П.8})$$

и применить оценку в виде ограничения сверху:

$$\left| \int_0^t \varphi(s)\psi_*(s) \int_0^s w_0(s-h)(\psi(h) - \psi_*(h))dh ds \right| \leq \gamma_0^2 = \text{const}, \quad \forall t \geq 0. \quad (\text{П.9})$$

Первый интеграл в правой части выражения (П.7) может быть ограничен снизу:

$$\int_0^t \varphi(s)(\psi(s) - \psi_*(s)) \int_0^s w_0(s-h)(\psi(h) - \psi_*(h))dh ds \geq 0, \quad \forall t \geq 0. \quad (\text{П.10})$$

Это будет выполнено тогда, когда импульсной переходной функции $w_0(t)$ соответствует передаточная функция (П.1) со свойствами положительности и вещественности, т. е. удовлетворяющая выполнению как неравенства

$$\text{Re} W_0(s) \geq 0, \quad \forall \omega, \quad (\text{П.11})$$

так и условий:

— функция $W_0(s)$ не имеет полюсов в полуплоскости $\text{Re}[s] > 0$;

— на оси $\text{Re}[s] = 0$ функция $W_0(s)$ имеет только простые полюсы, причем вычеты функций в этих полюсах вещественны и положительны.

Прежде всего, выполнение требования (П.11) относительно функции (П.1) очевидно, поскольку

$$\text{Re} \left(\frac{1}{1 - \exp(-j\omega T)} \right) = \frac{1 - \cos \omega T}{(1 - \cos \omega T)^2 + \sin^2 \omega T} = \frac{1}{2} > 0, \quad \forall \omega.$$

Далее, решением уравнения

$$1 - \exp(-sT) = 0$$

является выражение

$$S_k = j \frac{2\pi k}{T}, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (\text{П.12})$$

следовательно, передаточная функция не имеет полюсов в правой полуплоскости.

Наконец, как следует из соотношения (П.12), функция $W_0(s)$ имеет только простые полюсы, причем вычеты функций в этих полюсах вещественны и положительные. Действительно, в силу известных преобразований, получаем

$$\text{Re} W_0(s)_{s=S_k} = \lim_{s \rightarrow S_k} \left(\frac{1 - \exp(-sT)}{s - S_k} \right)^{-1} = \frac{1}{T} > 0.$$

Следовательно, передаточная функция (П.1) удовлетворяет неравенству (П.11), не имеет полюсов в правой полуплоскости корней, на оси $\text{Re}[s] = 0$ имеет только простые полюсы, и вычеты функций в этих полюсах вещественны и положительны. Другими словами, оценка (П.10) имеет место.

Таким образом, левая часть соотношения (17) или интеграл (П.4), с учетом выражений (П.7)—(П.10), будет удовлетворять оценке вида

$$\eta_0(0, t) = \int_0^t \varphi(s)\psi(s) \left(\int_0^s w_0(s-h)\psi(h)dh - v_*(s) \right) ds \geq -\gamma_0^2, \quad \forall t \geq 0,$$

что и требовалось доказать.

ЛИТЕРАТУРА

1. Закс В. С. Об одной возможности повышения точности регулирования в следящих системах циклического действия // Автоматика и телемеханика. — 1981. — № 1. — С. 170—174.
2. А. с. 723510 СССР. Система автоматического регулирования / В. С. Закс // Бюл. — 1980. — № 11. — С. 193.
3. *Repetitive Control System: A New Type Servo System for Periodic Exogenous Signals* / Hara Shinji, Yamamoto Yutaka, Omata Tohru, Nakato Micho // IEEE Trans. on automatic control. — 1988. — Vol. 33, N 7. — P. 659—668.
4. Цыпкин Я. З. Синтез робастно оптимальных систем управления объектами в условиях ограниченной неопределенности // Автоматика и телемеханика. — 1992. — № 9. — С. 139—159.
5. Кацевич В. Л., Королев В. В., Никольский А. А. Применение самообучающихся электроприводов подачи токарных станков для повышенной точности формы серийных деталей // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2004. — № 5. — С. 21—25.
6. Еремин Е. Л. Новый тип алгоритмов параметрической настройки адаптивных регуляторов для систем управления нестационарными T -периодическими объектами // Информатика и системы управления. — 2003. — № 2. — С. 100—110.
7. Пат. 2265873 РФ. Адаптивная система управления для динамических объектов с периодическими коэффициентами / Е. Л. Еремин, М. С. Капитонова, Л. В. Чепак // Бюл. — 2005. — № 34. — С. 380.
8. Попов В. М. Гиперустойчивость автоматических систем. — М.: Наука, 1970. — 456 с.
9. Фрадков А. Л. Адаптивное управление в сложных системах. — М.: Наука, 1990. — 296 с.
10. Еремин Е. Л., Цыкунов А. М. Синтез адаптивных систем управления на основе критерия гиперустойчивости. — Бишкек: Илим, 1992. — 182 с.
11. Еремин Е. Л. Алгоритмы адаптивной системы управления с явно-неявной эталонной моделью для строго минимально-фазового объекта // Информатика и системы управления. — 2004. — № 2. — С. 157—166.

e-mail: eremin@amursu.ru

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

ОБ УПРАВЛЕНИИ ОБЪЕКТОМ С АПРИОРНО НЕОПРЕДЕЛЕННОЙ СТРУКТУРОЙ ВЕКТОРА СОСТОЯНИЯ

В. А. Погорелов

Ростовский военный институт Ракетных войск, г. Ростов-на-Дону

Рассмотрен метод, позволяющий осуществлять точный синтез законов управления нелинейным стохастическим объектом с неопределенной структурой вектора состояния, оптимальных в смысле нелинейных вероятностных критериев. Показаны преимущества предложенного метода по сравнению с методом управления, не предполагающим точную идентификацию структуры вектора состояния в процессе движения объекта. Приведен пример практического использования предлагаемого подхода.

ВВЕДЕНИЕ

Существующие методы синтеза стохастического управления предполагают представление вектора состояния объекта управления в форме Ито или Ланжевена [1–3]. Предполагается, что векторные и матричные функции, входящие в правые части стохастических уравнений, известны с требуемой точностью. Однако в практических приложениях часто встречаются случаи, когда, по тем или иным причинам, априори не удастся точно определить не только отдельные параметры вектора состояния подвижного объекта (ПО), но и некоторую часть структуры правых частей уравнений [1, 4–9]. Очевидно, что в таких случаях применить известные методы к синтезу управления ПО без дополнительного привлечения методов идентификации или робастных алгоритмов не представляется возможным. Остановимся на некоторых аспектах применения последних в системах управления.

Существующие методы стохастической непараметрической идентификации многосвязных многомерных объектов предполагают наличие огромного объема экспериментального материала, который для уникальных объектов из-за ограниченного жизненного цикла получить, в принципе, невозможно [1, 2]. Но даже для серийно выпускаемых объектов проблема непараметрической идентификации вследствие старения материала, износа конструкции, эксплуатации в экстремальных режимах и прочего остается нерешенной. Например, при синтезе вектора состояния корректируемой гиросtabilизированной платформы модель ее дрейфа описывается полиномами второго порядка с известными по результатам наземных калибровок коэффициентами [5, 7]. Такая модель оказывается адекватной при перегрузках, не превышающих 15–20 g. В случае движения объекта

с большими перегрузками, например, при аварийном спуске космического аппарата с орбиты, данная модель оказывается неадекватной реальному движению платформы, т. е. модель углового движения объекта управления не соответствует априорным предположениям, что ведет к структурной неопределенности его вектора состояния.

В определенной степени решить проблему управления объектом с частично неопределенной структурой можно, применив робастные методы [8–12]. Они гарантируют надежное управление объектом в условиях действия возмущений с априорно неопределенными вероятностными характеристиками [11]. Однако грубость робастных методов, обусловленная, как правило, упрощением модели объекта, не всегда позволяет синтезировать требуемый закон управления.

В какой-то мере проблему грубости робастного управления решает часто применяемый на практике способ коррекции модели измерений, осуществляемый путем привлечения внешней информации, например, показаний спутниковых навигационных систем [13]. Хотя такой подход и позволяет существенно повысить точность управления движением, его применение может войти в противоречие с требованиями, предъявляемыми к объекту управления в целом, например, автономности его функционирования. Кроме того, анализ способов применения различных систем коррекции показывает, что они эффективны только в определенных условиях эксплуатации объекта управления, что ограничивает их применение [14].

Можно сделать вывод, что разработка нового подхода к синтезу управления нелинейными стохастическими объектами с неизвестной структурой является актуальной научной и практической задачей. Рассмотрим один из возможных подходов к ее решению.



1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть стохастический объект описывается нелинейным векторным дифференциальным уравнением размерности N в симметризованной форме

$$\dot{X} = f_0(X, t) + f_1(X, t)Q + f_2(X, t)U + f_3(X, t)V, \quad (1)$$

где X — N -мерный вектор состояния системы; f_i ($i = 0, \dots, 3$) — известные нелинейные векторная и матричные функции размерностей $N, N \times M, N \times S$ и $N \times L$, удовлетворяющие условию Липшица $\forall X, t$; $Q(X, t)$ — M -мерная неизвестная вектор-функция, определяемая физическими свойствами объекта и подлежащая идентификации по показаниям измерителя, $M \leq N$; $U(X, t)$ — L -мерный вектор искомого управления, $S \leq N$; V_t — G -мерный вектор нормированного белого гауссовского шума с нулевым средним и матрицей интенсивностей $D_V(t), L \leq N$.

Структурно неопределенный управляемый вектор X наблюдается с помощью измерителя, описываемого в общем случае нелинейным стохастическим уравнением вида

$$Z = H(X, t) + W_t,$$

где Z — K -мерный вектор выходных сигналов измерителя, $K \leq N$; $H(X, t)$ — известная нелинейная вектор-функция наблюдения размерности K , удовлетворяющая условию Липшица $\forall X, t$; W_t — белый гауссовский вектор-шум измерения размерности K с нулевым средним и матрицей интенсивностей $D_w(t)$

Апостериорная плотность вероятности (АПВ) $\rho(X, Q, U, t/Z(\tau), \tau \in [0, t]) = \rho_z$ такого процесса, удовлетворяющего приведенным условиям, описывается интегродифференциальным уравнением с частными производными Стратоновича [1]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_z}{\partial t} &= L\{q, b, \rho_z\} - \text{div}(f_1 Q)\rho_z - \text{div}(f_2 U)\rho_z + [R - R_0]\rho_z = \\ &= S[\rho_z] - \text{div}(f_1 Q)\rho_z - \text{div}(f_2 U)\rho_z, \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$L\{q, b, \rho_z\} = -\text{div}\{q(X, t)\rho_z\} + \frac{1}{2} \text{div}[\overrightarrow{\text{div}}\{b(X, t)\rho_z\}],$$

$$q(X, t) = f_0(X, t) + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial X} f_3(X, t) D_V [f_3^T(X, t)]^{(v)},$$

$$b(X, t) = f_3(X, t) D_V f_3^T(X, t),$$

$$R = R(X, t) = -\frac{1}{2} [Z - H(X, t)]^T D_W^{-1} [Z - H(X, t)],$$

$$R_0 = \int_{-\infty}^{\infty} R(X, t) \rho_z dX,$$

(v) означает операцию преобразования матрицы в вектор [6]: $A^v = |a_{11} \ a_{21} \ \dots \ a_{m1} \ a_{12} \ a_{22} \ \dots \ a_{m2} \ \dots \ a_{1n} \ a_{2n} \ \dots \ a_{mn}|^T$, $\overrightarrow{\text{div}}$ — символ операции дивергенции строки матрицы.

Задачу совместной идентификации структуры вектора состояния и формирования управления стохастической динамической системой при наличии текущих наблюдений за ее вектором состояния будем рассматривать далее как задачу синтеза вектора управления U и вектор-функции Q в реальном масштабе времени. Иными словами, задачу поиска искомого управления U и вектор-функции Q сформулируем далее как задачу синтеза таких векторов U и Q , которые доставляли бы минимум функционалу J , характеризующему текущее качество функционирования стохастической системы (1) в момент времени t :

$$J = - \int_{\dot{X}} \Phi_1[\rho_z] dX + \int_{t_0}^t \int_{\dot{X}} \Phi_2[U, Q] dt. \quad (3)$$

Учитывая, что исчерпывающей характеристикой случайного процесса является его АПВ, в качестве величины Φ_1 целесообразно выбрать критерий, выраженный через нее. Им может быть информационный критерий Фишера, Шеннона, Кульбака и другие [1], позволяющие получить потенциально более точные оценки вектора состояния X вследствие оптимизации всего процесса X_t , а не его локальной характеристики — дисперсии, как в традиционном среднеквадратическом критерии. Отметим, что при выборе критерия Φ_1 важно обеспечить компромисс между требуемой точностью и объемом вычислительных затрат. Так, например, использование в качестве критерия Φ_1 функционала Фишера

$$\Phi_1 = -\rho_z \left[\frac{\partial \ln \rho_z}{\partial X} \right] \left[\frac{\partial \ln \rho_z}{\partial X} \right]^T$$

обеспечивает большую по сравнению с критерием Шеннона $\Phi_1 = -\rho_z \ln \rho_z$ точность, но требует дополнительных вычислительных затрат.

Отсутствие информации о структуре вектор-функции Q увеличивает энтропию состояния системы. Поэтому процесс идентификации вектор-функции Q должен, прежде всего, осуществляться с целью минимизации неопределенности вектора состояния системы (1), причем требовать минимума энергетических затрат, т. е. минимума квадратичной формы $Q^T Q$.

В ряде прикладных задач, например, навигации ПО, обработки и передачи информации, распознавания образов и других возникает необходимость максимизации информации о векторе состояния объекта или минимизации его энтропии. Решение этой задачи, наряду с идентификацией структуры вектора состояния, может быть осуществлено путем синтеза управления максимизирующего АПВ ρ_z . При этом управление U необходимо осуществлять, как и идентификацию Q , с минимальными энергетическими затратами, минимум которых можно обеспечить, минимизировав квадратичную форму $U^T U$.

Можно сделать вывод, что между векторами U и Q возникает смысловая и формальная общность, что позволяет объединить их в блочный вектор $P = |Q^T : U^T|^T$, а в качестве функционала Φ_2 рассматривать квадратичную форму $P^T P$.

С учетом введенного вектора P критерий (3) принимает вид

$$J = \int_X \Phi_1[\rho_z] dX + \int_{t_0}^t \int P^T P dt, \quad (4)$$

а уравнение (2) можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_z}{\partial t} &= L\{q, b, \rho_z\} - \operatorname{div}\{(E \otimes P(X, t))\rho_z\} + [R - R_0]\rho_z = \\ &= S[\rho_z] - \operatorname{div}\{(E \otimes P)\rho_z\}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $E = [f_1(X, t) \ ; \ f_2(X, t)]$, \otimes — знак блочного умножения матриц [6].

2. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СОВМЕСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИИ

Для решения поставленной задачи приведем систему уравнений (1) к виду

$$\dot{X} = f_0(X, t) + E \otimes P + f_3(X, t)V_1$$

и введем обобщенную функцию Ψ , выражаемую через вектор P как $\Psi(X, t) = E \otimes P$, или $P = E^{-1} \otimes \Psi(X, t)$, где $E^{-1} = [f_1^{-1}(X, t) \ ; \ f_2^{-1}(X, t)]$.

Для синтеза функции Ψ воспользуемся известным фактом, что при неотрицательно определенной критериальной функции (в силу неизбежности положительной определенности информационных функционалов, а также «энергетической» составляющей критерия (4)) для обеспечения ее минимального значения в каждый момент времени достаточно, чтобы производная ее по времени, взятая с обратным знаком, имела максимум [3, с. 380]. Применение данного положения к критерию (4) приводит к условию:

$$\begin{aligned} \max_{\Psi}(-\dot{J}) &= \max_{\Psi} \left\{ - \int_X \left(\frac{\partial \Phi_1}{\partial \rho_z} \dot{\rho}_z + \Psi^T (E^{-1})^T E^{-1} \Psi \right) dX \right\} = \\ &= \max_{\Psi} \left\{ - \int_X \left(\frac{\partial \Phi_1}{\partial \rho_z} \left\{ S[\rho_z] - \frac{\partial \Psi}{\partial X} \rho_z - \Psi \frac{\partial \rho_z}{\partial X} \right\} + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \Psi^T (E^{-1})^T E^{-1} \Psi \right) dX \right\}. \end{aligned}$$

Анализ полученного выражения показывает, что решение поставленной задачи сводится к классической задаче нахождения вектор-функции Ψ , реализующей минимум определенного интеграла

$$\int_X \left(\frac{\partial \Phi_1}{\partial \rho_z} \left\{ S[\rho_z] - \frac{\partial \Psi}{\partial X} \rho_z - \Psi \frac{\partial \rho_z}{\partial X} \right\} + \Psi^T (E^{-1})^T E^{-1} \Psi \right) dX.$$

Искомая вектор-функция Ψ должна удовлетворять уравнению Эйлера:

$$-\frac{\partial}{\partial X} \frac{\partial \Phi_1}{\partial \rho_z} \rho_z + \frac{\partial \Phi_1}{\partial \rho_z} \frac{\partial \rho_z}{\partial X} - \frac{\partial}{\partial \Psi} (\Psi^T (E^{-1})^T E^{-1} \Psi) = 0$$

или в компактном виде

$$\left[\frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial X \partial \rho_z} \right] \rho_z + 2\Psi^T (E^{-1})^T E^{-1} = 0.$$

Из полученного уравнения можно определить промежуточный вектор

$$\Psi_{\text{опт}} = -\frac{1}{2} E \otimes E^T \left[\frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial X \partial \rho_z} \right]^T \rho_z.$$

Очевидно, что искомый вектор P в этом случае может быть представлен как

$$P_{\text{опт}} = -\frac{1}{2} E_T \otimes \left[\frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial X \partial \rho_z} \right]^T \rho_z. \quad (6)$$

Выражение (6) позволяет получить как вектор оптимального управления системой (1)

$$U_{\text{опт}} = -\frac{1}{2} f_2(X, t) \left[\frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial X \partial \rho_z} \right]^T \rho_z, \quad (7)$$

так и найти априорно неизвестную вектор-функцию, минимизирующую энтропию системы (1)

$$Q = -\frac{1}{2} f_1(X, t) \left[\frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial X \partial \rho_z} \right]^T \rho_z.$$

Функция ρ_z в выражении (5) определяется из решения нелинейного уравнения, полученного после подстановки $P_{\text{опт}}$ в уравнение (5):

$$\frac{\partial \rho_z}{\partial t} = S[\rho_z] + \frac{1}{2} \operatorname{div} \left\{ E \otimes E^T \left[\frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial X \partial \rho_z} \right]^T \rho_z^2 \right\}. \quad (8)$$

По вычислительным затратам решение уравнения (8) оказывается не намного сложнее, чем решение исходного уравнения (5). Более того, сходство структур уравнений (5) и (8) определяет возможность применения в случае уравнения (8) методов, разработанных для решения уравнения (5).

Анализ выражения (7) показывает, что $U_{\text{опт}}$ зависит от параметров вектора состояния объекта (1), которые, исходя из постановки задачи, не известны. Данное обстоятельство делает принципиально невозможным использование выражения (7) для управления объектом (1) и требует проведения дополнительных преобразований.

Умножим обе части выражения (7) на ρ и проинтегрируем полученный результат по X . В итоге получим

$$\hat{U}_{\text{опт}} = -\frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} f_2(X, t) \left[\frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial X \partial \rho_z} \right]^T \rho_z^2 dX.$$

Хотя найденное управление $\hat{U}_{\text{опт}}$ является субоптимальным, оно оказывается независимым от X , следовательно, его можно использовать, в отличие от выражения (7), для управления движением объекта.



3. ПРИМЕР

Для иллюстрации эффективности предложенного подхода рассмотрим следующий пример.

Объект управления описывается уравнением

$$\dot{x} = -x^3 + xq + 2xu + v_t, \quad x(t_0) = 0, \quad (9)$$

где q — априорно неизвестная функция, зависящая от x , u — искомое управление, v_t — белый центрированный гауссовский шум интенсивности D_v .

Уравнение наблюдателя имеет вид

$$\dot{z} = \frac{3}{2}x^2 + w_t,$$

где w_t — белый центрированный гауссовский шум интенсивности D_w .

Приведем выражение (9) к следующему виду:

$$\dot{x} = -x^3 + e \otimes U + v_t, \quad \text{где } e = |x \ 2x| \text{ а } U = |q \ u|^T.$$

Необходимо найти такой вектор U , который обеспечивал бы в текущий момент времени максимум информации о состоянии объекта, т. е. обеспечивал бы идентификацию функции q и синтез оптимального управления u . Для простоты дальнейших рассуждений в качестве меры информации рассмотрим функционал Шеннона. Тогда в соответствии с изложенным минимизируемый критерий принимает вид:

$$J = - \int_{-\infty}^{\infty} \rho_z(x, t) \ln \rho_z(x, t) dx + \int_{t_0}^t \int U^2(x, t) dx dt.$$

В рассматриваемом случае АПР ρ_z описывается уравнением Стратоновича вида

$$\frac{\partial \rho_z}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (x^3 \rho_z) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \rho_z}{\partial x^2} + \frac{\rho_z}{2D_w} \left\{ 3Z \left(x^2 - \int_{-\infty}^{\infty} x^2 \rho_z dx \right) + \frac{9}{4} \left(\int_{-\infty}^{\infty} x^4 \rho_z dx - x^4 \right) \right\} - \frac{\partial}{\partial x} (eU \rho_z) = S(\rho_z) - \frac{\partial}{\partial x} (\Gamma \rho_z), \quad (10)$$

где функция

$$\Gamma = eU \quad (11)$$

введена для упрощения дальнейших математических преобразований.

Формируя условие оптимальности, имеем:

$$\begin{aligned} \max_{\Gamma} (-J) &= \max_{\Gamma} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \left[(1 + \ln \rho_z) \frac{\partial \rho_z}{\partial t} - \Gamma^T (e^{-1})^T e^{-1} \Gamma \right] dx \right\} = \\ &= \max_{\Gamma} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \left([1 + \ln \rho_z] S(\rho_z) - (1 + \ln \rho_z) \rho_z \frac{\partial \Gamma}{\partial x} - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - (1 + \ln \rho_z) \frac{\partial \rho_z}{\partial x} \Gamma - \Gamma^T (e^{-1})^T e^{-1} \Gamma \right) dx \right\} = \end{aligned}$$

$$= \max_{\Gamma} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \left(B_0(\rho_z, x) + B_1(\rho_z, x) \frac{\partial \Gamma}{\partial x} + B_2(\rho_z, x) \Gamma - \Gamma^T (e^{-1})^T e^{-1} \Gamma \right) dx \right\},$$

где $e^{-1} = \left| \frac{1}{x} \ \frac{1}{2x} \right|$, $B_0(\rho_z, x) = [1 + \ln \rho_z] S(\rho_z)$, $B_1(\rho_z, x) = (1 + \ln \rho_z) \rho_z$, $B_2(\rho_z, x) = (1 + \ln \rho_z) \frac{\partial \rho_z}{\partial x}$.

Уравнение Эйлера, исходное для построения искомого управления U и определения функции q , имеет вид

$$\frac{\partial B_1(\rho_z, x)}{\partial x} - B_2(\rho_z, x) + \Gamma^T (e^{-1})^T e^{-1} \Gamma = 0. \quad (12)$$

Выражение (12) позволяет найти искомый вектор

$$\Gamma = \frac{1}{2} e e^T \left(B_2 - \frac{\partial B_1}{\partial x} \right) = \frac{1}{2} e e^T \rho_z, \quad (13)$$

который, в свою очередь, позволяет синтезировать уравнение для вектора U . С учетом вида функции (11) выражение (13) можно записать как

$$U = \frac{1}{2} e^T \rho_z.$$

Отсюда получаем выражения для: оптимального управления $u = x \rho_z$,

субоптимального управления $\hat{u} = \int_{-\infty}^{\infty} x \rho_z^2 dx$

и искомой функции — $q = \frac{1}{2} x \rho_z$.

После подстановки U в выражение (10) имеем:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_z}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(x^3 \rho_z - x \rho_z - \frac{1}{2} x^2 \rho_z \right) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \rho_z}{\partial x^2} + \\ &+ \frac{\rho_z}{2D_w} \left\{ 3Z \left(x^2 - \int_{-\infty}^{\infty} x^2 \rho_z dx \right) + \frac{9}{4} \left(\int_{-\infty}^{\infty} x^4 \rho_z dx - x^4 \right) \right\}. \quad (14) \end{aligned}$$

Для иллюстрации эффективности применения предложенного подхода было решено уравнение (14) методом прямоугольных сеток на интервале $x \in [-30, 30]$, $t \in [0, 200 \text{ с}]$ с равным шагом для всего интервала $\Delta x = 0,1$, $\Delta t = 0,05 \text{ с}$ при $D_w = 1,5$; $D_v = 2$. Значения $Z(t)$ получены в результате численного моделирования уравнений объекта и наблюдателя на интервале $t \in [0, 200 \text{ с}]$ методом Рунге — Кутты 4-го порядка с шагом $\Delta t = 0,05 \text{ с}$ (управление u формировалось в масштабе времени поступления измерительной информации, т. е. для каждого временного шага моделирования t_j).

В результате решения расчетное значение критерия J для найденной оптимальной функции управления u и идентифицируемой на основе разработанного метода функции q оказалось равным 4,5. А в случае эмпирически выбранной функции q (в тестовом примере

функция q была выбрана равной $q = \frac{1}{2} x^3 p_z$) оно оказалось равным 2,5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

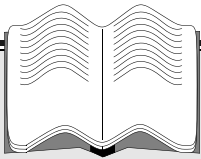
Сравнительный анализ предложенного метода с уже существующими способами [7–12] управления объектами с априорно неопределенными структурами векторов состояния показывает, что он более точен, так как позволяет не только управлять подвижным объектом, но и достаточно точно идентифицировать структуру (1) в процессе его движения. Кроме того, он требует меньших вычислительных затрат по сравнению с подходом, рассмотренным в работе [1], и позволяет управлять объектами в отсутствие каких-либо допущений о характере шумов измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хуторцев В. В., Соколов С. В., Шевчук П. С. Современные принципы управления и фильтрации в стохастических системах. — М.: Радио и связь, 2001.
2. Тертычный-Даури В. Ю. Стохастическая механика. — М.: Факториал Пресс, 2001.
3. Казаков И. Е. Статистическая теория систем управления в пространстве состояния. — М.: Наука, 1975.
4. Бурлай И. В. Оценивание состояния маневрирующих объектов с использованием неклассических целевых функционалов и элементов регуляризации // Известия РАН. Теория и системы управления. — 2001. — № 1.
5. Пупков К. А., Неусыпин К. А. Вопросы теории и реализации систем управления и навигации. — М.: Биоинформ, 1997.
6. Чернов А. А., Ястребов В. Д. Метод оценки возмущений в алгоритмах решения навигационных задач // Космич. исслед. — 1984. — Т. 22, № 3.
7. Ганеев М. Р., Погорелов В. А., Соколов С. В. Синтез системы навигации, содержащей управляемую гиросtabilизированную платформу на основе информационных критериев // Изв. РАН. Теория и системы управления. — 2002. — № 3.
8. Пелевин А. Е. Синтез робастного закона управления при неопределенностях параметров модели объекта // Гироскопия и навигация. — 1999. — № 2.
9. Сомов Е. И. Робастная стабилизация упругих космических аппаратов при неполном дискретном измерении и запаздывании в управлении // Известия РАН. Теория и системы управления. — 2001. — № 1.
10. Никифоров В. О. Адаптивное и робастное управление с компенсацией возмущений. — СПб.: Наука, 2003.
11. Небылов А. В. Гарантирование точности управления. — М.: Наука, 1998.
12. Arcak M. and Kokotovic P. Nonlinear observers: A circle criterion design and robustness analysis // Automatica. — 2001. — Vol. 37.
13. Интегрированные инерциально-спутниковые системы / Под ред. В.Г. Пешехонова. — СПб.: ГНЦ РФ-ЦНИИ «Электроприбор», 2001.
14. Дятлов А. П., Дятлов П. А., Кульбикаян Б. Х. Радиоподавление аппаратуры потребителей спутниковой радионавигационной системы «Навстар» сигналами помехами // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. — 2004. — № 4.

e-mail: locman@ctsnet.ru

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.С. Манделем. □



Журнал «Информационные войны»

представляют Центр исследований проблем безопасности Российской академии наук и Центр проблем стратегических ядерных сил Академии военных наук.

Цель нового издания:

разработка теории информационного противоборства, научно-методических основ проведения информационных операций и противодействия информационной агрессии, освещение практики и истории информационных войн в экономике и политике.

Задачи:

- ✓ содействие в разработке теории информационного противоборства;
- ✓ выявление угроз и источников информационной агрессии, разработка стратегий их нейтрализации и оценки рисков;
- ✓ разработка методических документов, учебных пособий, инструкций, деловых обучающих игр, применение этих разработок на практике;
- ✓ экспертиза проектов информационного противоборства и информационных войн в социально-экономических системах разной природы и масштаба — от предприятия и корпорации до государства и мирового сообщества.

Направления активности: фундаментальные исследования, прикладные разработки, научная публицистика, просвещение.

Основные рубрики:

- теория информационного противоборства;
- практика информационных войн в политике и бизнесе;
- история информационных войн.

По вопросам распространения и подписки на журнал обращаться

по тел. (495) 334-91-91, (495) 687-69-04; факс (495) 334-89-11;

e-mail: bbc@ipu.ru; buharinSn@yandex.ru

СТРУКТУРНО-ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ФУНКЦИИ В ЗАДАЧАХ ДИСКРЕТНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

В. Н. Бурков⁽¹⁾, И. В. Буркова⁽¹⁾, П. А. Колесников⁽¹⁾, А. Р. Кашенков⁽²⁾

⁽¹⁾ *Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва;*

⁽²⁾ *Вологодский государственный педагогический университет*

Дано обобщение метода сетевого программирования на случай, когда целевая функция и функции, описывающие ограничения задачи, имеют одинаковые структуры сетевого представления. Приведены примеры решения конкретных задач дискретной оптимизации.

ВВЕДЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Любая функция дискретных переменных может быть представлена в виде суперпозиции более простых функций (в частности — в виде суперпозиции функций меньшего числа переменных). Структуру такой суперпозиции можно представить сетью, начальные вершины (входы) которой соответствуют переменным, конечная (выход) — функции, а промежуточные — функциям, входящим в суперпозицию. Поэтому такое представление называется сетевым представлением. В. Н. Бурковым и И. В. Бурковой предложен метод решения задач дискретной оптимизации с аддитивной целевой функцией, предполагающий сетевое представление системы ограничений [1]. Метод получил название метода сетевого программирования, а в случае дихотомического представления — метода дихотомического программирования [2, 3]. В настоящей работе дается обобщение метода на случай, когда целевая функция и функции, описывающие ограничения задачи, имеют одинаковые структуры сетевого представления (структурно-эквивалентные функции).

Заметим, что одна и та же функция может иметь несколько сетевых представлений.

Пример 1. Рассмотрим функцию четырех переменных

$$f(x) = (x_1x_2 + x_1^2)x_3 + x_3x_4 + x_1x_4. \quad (1)$$

Ее сетевое представление приведено на рис. 1, где

$$\begin{aligned} y_1 &= x_1x_2 + x_1^2, \\ y_2 &= y_1x_3, \\ y_3 &= x_1x_4, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y_4 &= x_3x_4, \\ y_5 &= y_2 + y_3 + y_4. \end{aligned}$$

На рис. 2 приведено другое сетевое представление функции (1), где

$$\begin{aligned} y_1 &= x_1x_2x_3, \\ y_2 &= x_1^2x_3, \\ y_3 &= x_1 + x_3, \\ y_4 &= x_4y_3, \\ y_5 &= y_1 + y_2 + y_4. \end{aligned}$$

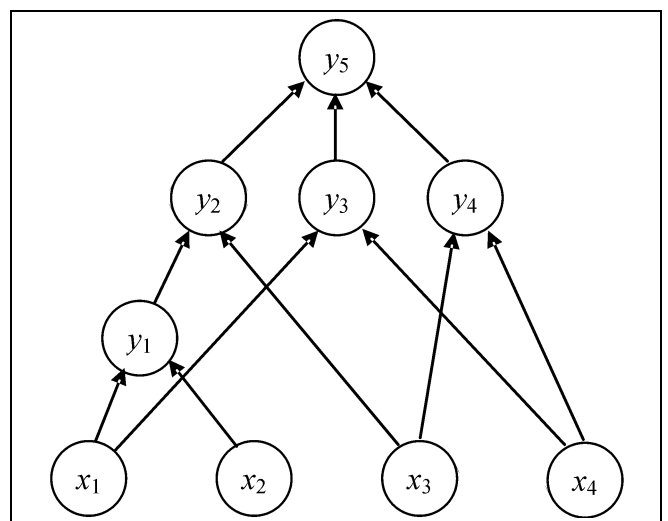


Рис. 1. Сетевое представление функции (1)

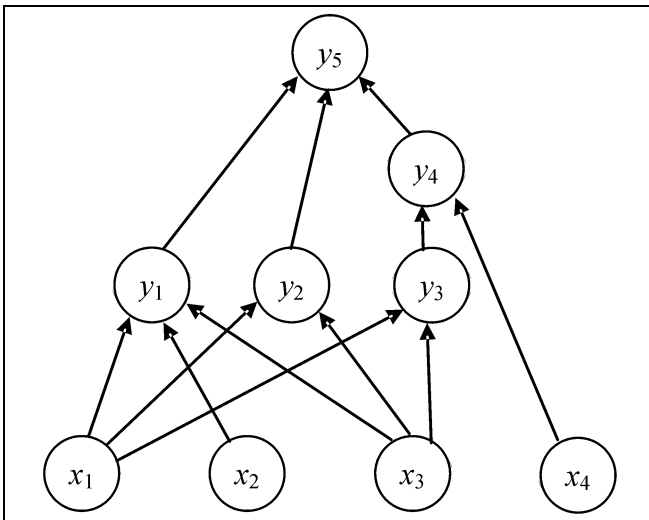


Рис. 2. Вариант сетевого представления функции (1)

Определение. Функции $f(x)$ и $\varphi(x)$ называются структурно-эквивалентными (с-эквивалентными), если существуют сетевые представления этих функций такие, что соответствующие сетевые структуры совпадают.

Пример 2. Рассмотрим функцию

$$\varphi(x) = (x_1 + x_2)x_3(x_1 + x_4) + x_3x_4. \quad (2)$$

Нетрудно показать, что одно из сетевых представлений этой функции имеет вид, представленный на рис. 1. ♦

1. МЕТОД СЕТЕВОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Рассмотрим следующую задачу дискретной оптимизации: определить вектор $x \in X$, обеспечивающий

$$\max_{x \in X} f(x) \quad (3)$$

при ограничении

$$\varphi(x) \leq b. \quad (4)$$

Далее будем предполагать, что

$$X = \prod_i X_i,$$

где X_i — дискретное множество чисел.

Заметим, что в виде (4) несложно представить и систему неравенств:

$$\varphi_j(x) \leq b, \quad j = \overline{1, m}.$$

Обозначив

$$\varphi(x) = \max_j \varphi_j(x),$$

получаем ограничение (4).

Пусть функции $f(x)$ и $\varphi(x)$ в задаче (3), (4) являются с-эквивалентными. Построим их общее сетевое представление. Пусть далее целевая функция f — монотонная функция обобщенных переменных y (без ограничения общности можно принять, что f — возрастающая функция y). Аналогично примем, что функция φ также является возрастающей функцией y . В сетевом представлении выделим вершины нулевого уровня, которым со-

ответствуют переменные x_i . Вершинам первого уровня соответствуют задачи оптимизации следующего вида: максимизировать

$$y_i = f_i(x)$$

при ограничении

$$z_i = \varphi_i(x) \leq p,$$

где p принимает все допустимые значения.

В сетевом представлении задачи, соответствующие вершинам сетевого представления (за исключением вершин первого уровня) имеют более простой вид, такой, что существуют эффективные алгоритмы их решения. В частности, если сетевое представление является дихотомическим, то каждая задача является задачей оптимизации функции двух переменных и в дискретном случае легко решается на основе матричного представления [2, 3]. Решив задачи первого уровня, переходим к решению задач второго уровня, и т. д. Последней решается задача, соответствующая выходу сети. Обозначим $y_k(b)$ — значение целевой функции в оптимальном решении задачи, соответствующей выходу сети, где k — число вершин сети за исключением n вершин нулевого уровня.

Теорема 1. Величина $y_k(b)$ является верхней оценкой для исходной задачи (3), (4).

Доказательство. Достаточно заметить, что любое допустимое решение задачи (3), (4) является допустимым решением для всех задач, решаемых в вершинах сетевого представления. Поэтому оптимальное решение задачи в конечной вершине не хуже, чем оптимальное решение исходной задачи. Это доказывает теорему. ♦

Таким образом, метод сетевого программирования для с-эквивалентных функций позволяет получать верхние оценки для задачи (3), (4).

Пример 3. Рассмотрим задачу (3), (4) с функцией $f(x)$, определяемой выражением (1) и функцией $\varphi(x)$, определяемой выражением (2). Примем $x_i = (1; 3)$ для всех $i = \overline{1, 4}$. Пусть $b = 30$.

1 шаг. Решаем задачу максимизации

$$y_1 = x_1x_2 + x_1^2$$

при ограничении

$$z_1 = x_1 + x_2 \leq p_1,$$

где p_1 принимает все допустимые значения. Для решения удобно применить матричное представление задачи (табл. 1). Верхние числа в клетках левой части табл. 1 равны значению y_1 , а нижние — z_1 при соответствующих значениях переменных x_1 и x_2 . Справа приведены результаты оптимизации.

Таблица 1

3	4	18
1	2	12
x_2	1	3
x_1		

6	18
4	12
2	2
z_1	y_1



2 шаг. Решаем задачу максимизации

$$y_2 = y_1 x_3$$

при ограничении

$$z_2 = z_1 x_3 \leq p_2.$$

Решение приведено в табл. 2.

Таблица 2

18	18	54
6	6	18
12	12	36
4	4	12
2	2	6
2	2	6
y_1	1	3
x_3		

18	54
12	36
6	18
4	12
2	2
z_2	y_2

3 шаг. Решаем задачу максимизации

$$y_3 = x_1 x_4$$

при ограничении

$$z_3 = x_1 + x_4 \leq p_4.$$

Решение приведено в табл. 3.

Таблица 3

3	3	9
4	4	6
1	1	3
2	2	4
x_4	1	3
x_1		

6	9
4	3
2	1
z_3	y_3

4 шаг. Решаем задачу максимизации

$$y_4 = x_3 x_4$$

при ограничении

$$z_4 = x_3 x_4 \leq p_4.$$

Решение приведено в табл. 4.

Таблица 4

3	3	9
3	3	9
1	1	3
1	1	3
x_4	1	3
x_3		

9	9
3	3
1	1
z_4	y_4

5 шаг. Решаем задачу максимизации

$$y_5 = y_2 + y_3$$

при ограничении

$$z_5 = z_2 z_3 \leq p_5.$$

Решение приведено в табл. 5.

В правой части табл. 5 оставлены только Парето-оптимальные варианты.

Таблица 5

9	11	21	—	—
6	12	24	—	—
3	5	15	21	—
4	8	16	24	—
1	3	13	19	37
2	4	8	12	24
y_3/z_3	2	12	18	36
y_2/z_2	2	4	6	12
24	37			
12	19			
8	13			
4	3			
z_5	y_5			

6 шаг. Решаем задачу максимизации

$$y_6 = y_4 + y_5$$

при ограничении

$$z_6 = z_4 + z_5 \leq 30.$$

Решение приведено в табл. 6.

Таблица 6

9	12	22	28	—
9	13	17	21	—
3	6	16	22	40
3	7	11	15	27
1	4	14	20	38
1	5	9	13	25
y_4/z_4	3	13	19	37
y_5/z_5	4	8	12	24
6	9			
4	3			
2	1			
z_3	y_3			

В табл. 6 находим клетку с максимальным верхним числом $y_6 = 40$. Согласно теореме 1, это число является оценкой сверху для решения исходной задачи. Для определения оптимального решения оценочной задачи применяем метод «обратного хода». Из табл. 6 определяем

$$y_4 = 3, \quad z_4 = 3, \quad y_5 = 37, \quad z_5 = 24.$$

Из левой части табл. 5 определяем

$$y_2 = 36, \quad z_2 = 12, \quad y_3 = 1, \quad z_3 = 2.$$

Из левой части табл. 4 определяем два возможных варианта:

- 1) $x_3(y_4) = 1, \quad x_4(y_4) = 3;$
- 2) $x_3(y_4) = 3, \quad x_4(y_4) = 1.$

Из левой части табл. 3 определяем

$$x_1(y_3) = 1, \quad x_4(y_3) = 1.$$

Из левой части табл. 2 определяем

$$x_3(y_2) = 3, \quad y_1 = 12, \quad z_1 = 4.$$

И, наконец, из левой части табл. 1 определяем

$$x_1(y_1) = 3, \quad x_2(y_1) = 1.$$

Заметим, что если бы существовало решение оценочной задачи такое, что каждое x_i принимало бы только одно значение, то это решение было бы допустимым для исходной задачи, а значит — оптимальным. В нашем

случае это не так. Действительно, из табл. 3 было определено $x_1(y_3) = 1$, а из табл. 1 было определено $x_1(y_1) = 3$, что противоречиво. Однако, имея способ определения верхней оценки, можно применить метод ветвей и границ. Рассмотрим применение метода на Примере 3.

Разобьем множество всех решений исходной задачи на два подмножества. В первом подмножестве $x_1 = 1$, а во втором $x_1 = 3$.

Оценка первого подмножества. Полагаем $x_1 = 1$ в функциях $f(x)$ и $\varphi(x)$ и применяем описанный ранее алгоритм. Далее приведена результирующая табл. 7 значений z_6 и y_6 .

Таблица 7

9	12	14	16	—
9	13	17	21	
3	6	8	10	16
3	7	11	15	27
1	4	6	8	14
1	5	9	13	25
y_4/z_4	3	5	7	13
y_5/z_5	4	8	12	24

Максимальное верхнее число $y_6 = 16$ определяет верхнюю оценку первого подмножества, $h(x_1 = 1) = 16$.

Оценка второго подмножества. В табл. 8 приведены значения z_6 и y_6 .

Таблица 8

9	24	—
9	25	
3	18	24
3	19	27
1	16	22
1	17	25
y_4/z_4	15	21
y_5/z_5	16	24

Верхняя оценка для второго подмножества $h(x_1 = 3) = 24$. Выбираем второе подмножество.

Методом обратного хода определяем все оптимальные решения оценочной задачи. Таких решений два.

Первое решение: $x_1 = 3, x_2 = 1, x_3(y_2) = 1, x_3(y_4) = 3, x_4(y_3) = 1, x_4(y_4) = 3$ не является допустимым для исходной задачи, поскольку $x_3(y_2) \neq x_3(y_4)$ и $x_4(y_3) \neq x_4(y_4)$.

Второе решение: $x_1 = 3, x_2 = 1, x_3(y_2) = x_3(y_4) = 1, x_4(y_3) = x_4(y_4) = 3$ является допустимым для исходной задачи и, следовательно, является оптимальным.

Итак, получено оптимальное решение:

$$x_1 = 3, x_2 = 1, x_3 = 1, x_4 = 3$$

со значением целевой функции, равным 24. ♦

2. ДРЕВОВИДНАЯ СТРУКТУРА СЕТЕВОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Для ряда задач существуют сетевые представления, в которых сеть является деревом. В этом случае при ре-

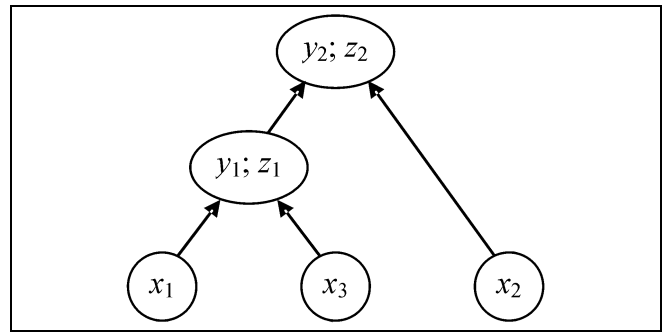


Рис. 3. Сетевое представление функций (5) и (6)

шении оценочной задачи каждая переменная x_i принимает только одно значение. Поэтому решение оценочной задачи всегда будет допустимым решением исходной задачи, а значит, описанный выше алгоритм определяет оптимальное решение исходной задачи.

Пример 4. Пусть $x_i = \{1; 3\}$ для всех $i = \overline{1, 3}$,

$$f(x) = x_1x_2 + 2x_2x_3, \tag{5}$$

$$\varphi(x) = x_1x_3 + 2x_2 \leq 10. \tag{6}$$

Представим функцию $f(x)$ в виде

$$f(x) = x_2(x_1 + 2x_3).$$

В этом случае структура сетевого представления функций $f(x)$ и $\varphi(x)$ имеет вид дерева, изображенного на рис. 3, где

$$y_1 = x_1 + 2x_3; \quad z_1 = x_1x_3;$$

$$y_2 = y_1x_2; \quad z_2 = z_1 + 2x_2.$$

Подставляя в функцию (6) минимальное значение $x_2 = 1$, получаем ограничение $z_1 \leq 8$. Решение задачи приведено в табл. 9 и 10.

Таблица 9

$(y_1; z_1) =$

3	7	—
1	3	5
x_3	1	3
x_1		

Таблица 10

$(y_2; z_2) =$

3	9	21
1	3	7
x_3	3	7
y_1/z_1	1	3

Максимальное верхнее число в клетках табл. 10 определяет оптимальное решение $x_1 = 1, x_2 = 3, x_3 = 3$, со значением целевой функции 21. ♦



3. СЕТЕВЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ФУНКЦИЙ

Рассмотрим случай, когда функция

$$f(x) = \sum_{i=1}^n f_i(x_i), \quad (7)$$

где $x_i \in X_i$.

Теорема 2. Аддитивная функция c -эквивалентна любой функции того же числа переменных.

Доказательство. Пусть G_n — сетевое представление некоторой функции n переменных, x_i — начальные вершины сети, $i = \overline{1, n}$. Для каждого значения $x_i \in X_i$ определим поток величины $f_i(x_i)$ из вершины x_i в конечную вершину сетевого представления. В силу условий «потоковости» величина потока в конечной вершине равна $f_i(x_i)$ для любого сетевого представления. Теорема доказана. ♦

Поскольку поток величины $f_i(x_i)$ для каждого x_i можно определять произвольно, существует бесконечное число сетевых представлений функции (7).

Пусть переменная x_i принимает m_i значений x_{ij} , $j = \overline{1, m_i}$. Обозначим s_{ij} — поток величины $c_{ij} = f_i(x_{ij})$ из вершины x_i в конечную вершину, $S = \{s_{ij}\}$ — совокупность всех потоков (их число равно $M = \sum_i m_i$), $F(S)$ —

оценка сверху величины (7), полученная методом сетевого программирования при сетевом представлении, определяемом совокупностью потоков S . Естественно поставить задачу определения такой совокупности потоков S , для которой оценка сверху минимальна. Эту задачу назовем двойственной к исходной. Сформулируем ее.

Двойственная задача. Определить совокупность потоков S , для которой оценка $F(S)$ минимальна.

Обоснованием названия «двойственная задача» служит тот факт, что для ряда задач целочисленного линейного программирования оценочная задача сводится к обычной двойственной задаче.

В качестве примера рассмотрим задачу назначения: максимизировать функцию

$$f(x) = \sum_{i=1}^n c_{ij} x_{ij}$$

при ограничениях $x_{ij} = \{0; 1\}$; $i, j = \overline{1, n}$,

$$\sum_j x_{ij} \leq 1, \quad i = \overline{1, n}; \quad (8)$$

$$\sum_i x_{ij} \leq 1, \quad j = \overline{1, n}. \quad (9)$$

Рассмотрим сетевое представление системы ограничений, приведенное на рис. 4 для случая $n = 2$. Вершина y_i соответствует i -у ограничению (8), а вершина z_j — j -му ограничению (9). Конечная вершина соответствует опе-

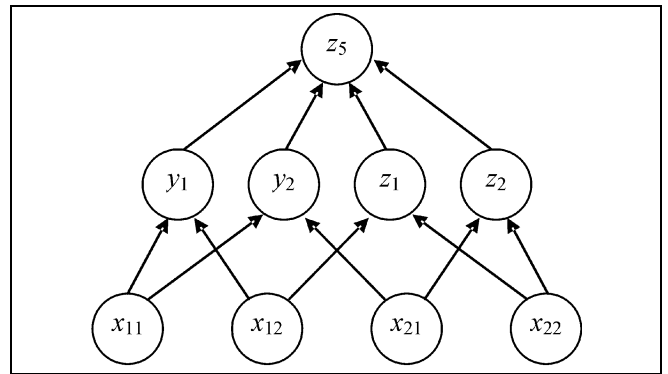


Рис. 4. Сетевое представление системы ограничений (8) и (9)

рации взятия максимума, что позволяет свести все ограничения к одному:

$$\max \left[\max_j \sum_i x_{ij}; \max_i \sum_j x_{ij} \right] \leq 1.$$

Если $x_{ij} = 0$, то $c_{ij} x_{ij} = 0$, и поток из соответствующей вершины равен нулю. Если $x_{ij} = 1$, то поток равен c_{ij} . Представим c_{ij} в виде $c_{ij} = u_{ij} + v_{ij}$, где $u_{ij} \geq 0$ и $v_{ij} \geq 0$ — потоки по соответствующим дугам из вершины x_{ij} . В вершинах y_i в соответствии с методом сетевого программирования решается следующая задача: максимизировать функцию

$$F_i(u_i) = \sum_j u_{ij} x_{ij}$$

при ограничении

$$\sum_j x_{ij} \leq 1.$$

Решение очевидно:

$$F_{\max}(u_i) = \max_j u_{ij}.$$

В вершинах z_j решаются задачи: максимизировать

$$\Phi_j(v_j) = \sum_i v_{ij} x_{ij}$$

при ограничении

$$\sum_i x_{ij} \leq 1.$$

Решение также очевидно:

$$\Phi_{\max}(v_j) = \max_i v_{ij}.$$

Двойственная задача: минимизировать

$$\sum_i \max_j u_{ij} + \sum_j \max_i v_{ij}. \quad (10)$$

при ограничениях

$$u_{ij} + v_{ij} = c_{ij}, \quad i, j = \overline{1, n}. \quad (11)$$

Заметим, что в оптимальном решении можно положить

$$u_{ij} = u_i - \max_j u_{ij}.$$

Обозначим

$$v_j = \max[0; \max_i (c_{ij} - u_i)].$$

В этом случае задача (10), (11) сводится к следующей: минимизировать сумму

$$\sum_i u_i + \sum_j v_j$$

при ограничениях $u_i \geq 0, v_j \geq 0,$

$$u_i + v_j \geq c_{ij}, \quad i, j = \overline{1, n}.$$

Это обычная двойственная задача для задачи назначения.

4. ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ДВОЙСТВЕННОЙ ЗАДАЧИ

Рассмотрим следующую задачу целочисленного программирования: максимизировать функцию

$$\sum_{i=1}^3 f_i(x_i),$$

где каждое x_i принимает два значения — 4 или 6, при ограничении

$$\varphi(x) = x_1^2 + x_1 x_2 x_3 + x_3^2 \leq 200. \quad (12)$$

Значения $f_i(x_i)$ при $x_i = 4$ и $6, i = \overline{1, 3}$ приведены в табл. 11.

Таблица 11

x_i	i		
	1	2	3
4	12	8	16
6	18	15	24

Сетевое представление функции $\varphi(x)$ приведено на рис. 5.

Примем, что потоки по дугам (x_1, y_1) и (x_1, y_2) из вершины x_1 равны 6 при $x_1 = 4$ и 9 при $x_1 = 6$, а потоки по дугам (x_3, y_1) и (x_3, y_3) из вершины x_3 равны 8 при $x_3 = 4$ и 12 при $x_3 = 6$ (т. е. делим соответствующее значение целевой функции пополам).

1 шаг. Решаем задачу оптимизации в вершине (y_1, z_1) : максимизировать выражение $6x_{11} + 9x_{12} + 8x_{21} + 15x_{22} +$

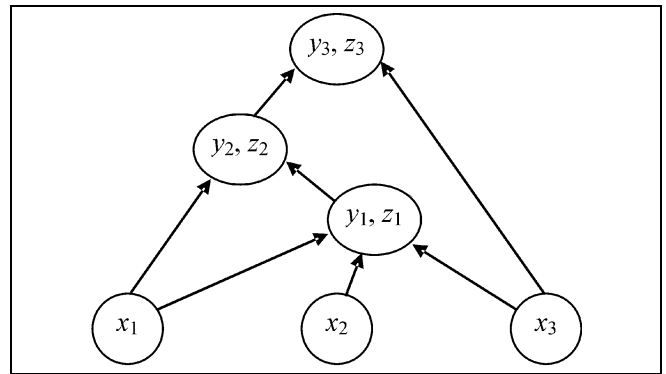


Рис. 5. Сетевое представление функции (12)

$+ 8x_{31} + 12x_{32}$ при ограничениях $x_{ij} = \{0; 1\}; i = 1, 2, 3; j = 1, 2;$

$$\begin{aligned} (4x_{11} + 6x_{12})(4x_{21} + 6x_{22})(4x_{31} + 6x_{32}) &\leq p, \\ x_{11} + x_{12} &= 1, \\ x_{21} + x_{22} &= 1, \\ x_{31} + x_{32} &= 1. \end{aligned}$$

Максимальное значение p легко получить, если подставить в функцию (12) минимальные значения $x_1^2 = 16$ и $x_3^2 = 16$. Получаем $p = 168$. Теперь задачу можно решить простым перебором. Получаем табл. 12 оптимальных решений.

Таблица 12

y_1, z_1, x_1, x_2, x_3	22 64 4; 4; 4	29 96 4; 6; 4	33 144 4; 6; 6
y_1	22	29	33
z_1	64	96	144
x_1, x_2, x_3	4; 4; 4	4; 6; 4	4; 6; 6

2 шаг. Решаем задачу, соответствующую вершине (y_2, z_2) . Решение приведено в табл. 13.

Таблица 13

$(y_2, z_2) =$	9	31	38	42
	36	100	132	180
6	28	35	39	
16	80	112	160	
x_1	22	29	33	
y_1/z_1	64	96	144	

3 шаг. Решаем задачу оптимизации, соответствующую вершине (y_3, z_3) . Решение приведено в табл. 14.

Таблица 14

$(y_3, z_3) =$	12	40	43	47	50	51	—
	36	116	136	148	168	196	—
	8	36	39	43	46	47	50
16	96	116	128	148	176	196	
x_3	28	31	35	38	39	42	
y_2/z_2	80	100	112	132	160	180	



Оптимальному решению соответствует клетка с максимальным верхним числом. Это клетка $(y_3, z_3) = (51; 196)$. Двигаясь от конца к началу, определяем оптимальное решение оценочной задачи. Имеем:

- 1) $x_3(y_3) = 6; (y_2, z_2) = (39, 160);$
- 2) $x_1(y_2) = 4; (y_1, z_1) = (33, 144);$
- 3) $x_1(y_1) = 4; x_2(y_1) = 6; x_3(y_1) = 6.$

Поскольку значения $x_1 = 4; x_2 = 6; x_3 = 6$ одинаковы во всех случаях, полученное допустимое решение является оптимальным. Однако это не всегда так. Пусть, например, $b = 170$. В этом случае оптимальному решению оценочной задачи соответствует клетка $(y_3, z_3) = (50; 168)$. Двигаясь с конца, определяем оптимальные значения переменных оценочной задачи:

- 1) $x_3(y_3) = 6; (y_2, z_2) = (38, 132);$
- 2) $x_1(y_2) = 6; (y_1, z_1) = (29, 96);$
- 3) $x_1(y_1) = 4; x_2 = 6; x_3(y_1) = 4.$

В данном случае $x_3(y_1) \neq x_3(y_3)$. Для улучшения оценки изменим потоки по дугам. Очевидно, что целесообразно уменьшить потоки по дугам (x_1, y_2) и (x_3, y_3) с тем, чтобы верхняя оценка уменьшилась. Примем

$$S_2(x_1, y_2) = 6; S_2(x_3, y_3) = 9;$$

$$S_2(x_1, y_1) = 12; S_2(x_3, y_1) = 15.$$

Решаем оценочную задачу.

1 шаг. Решаем задачу оптимизации в вершине (y_1, z_1) — табл. 15.

Таблица 15

y_1	22	29	29
z_1	64	96	96
x_1, x_2, x_3	4; 4; 4	4; 6; 4	4; 4; 6

2 шаг. Решаем задачу оптимизации в вершине (y_2, z_2) — табл. 16.

Таблица 16

6	28	35
36	100	132
6	28	35
16	80	112
x_1	22	29
y_1/z_1	64	96

3 шаг. Решаем задачу оптимизации в вершине (y_3, z_3) — табл. 17.

Таблица 17

9	37	44
36	116	148
8	36	43
16	96	128
x_3	28	35
y_2/z_2	80	112

Значение оценки $F = 44$. Двигаясь с конца, определяем решение оценочной задачи:

- 1) $x_3(y_3) = 6; (y_2, z_2) = (35, 112);$
- 2) $x_1(y_2) = 4; (y_1, z_1) = (29, 96);$
- 3) $x_1(y_1) = 4; x_2 = 4; x_3(y_1) = 6.$

Это решение является допустимым для исходной задачи, а значит — оптимальным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренный подход дает универсальный метод получения верхних оценок для широкого круга задач дискретной оптимизации, в том числе — для любых задач с аддитивными целевыми функциями. Перечислим ряд задач, требующих дальнейших исследований.

В первую очередь, это разработка методов определения структурной эквивалентности функций и построения соответствующих сетевых представлений с одинаковыми структурами.

Представляет интерес задача оценки вычислительной сложности методов решения оценочных задач.

Наконец, отметим задачу разработки методов решения двойственных задач для аддитивных целевых функций. Отметим, что понятие двойственной задачи можно обобщить на случай структурно-эквивалентных функций, имеющих несколько сетевых представлений с совпадающими структурами. Двойственной задачей в этом случае является задача выбора наилучшего сетевого представления с минимальной верхней оценкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурков В. Н., Буркова И. В., Овчинникова Т. И. Метод сетевого программирования // Проблемы управления. — 2005. — № 3. — С. 23–29.
2. Бурков В. Н., Буркова И. В. Метод дихотомического программирования. — Теория активных систем // Тр. междунар. науч.-практ. конф. (17–19 ноября 2003 г. Москва, Россия). — М.: ИПУ РАН, 2003. — Т. 1 — С. 25–26.
3. Бурков В. Н., Буркова И. В. Задачи дихотомической оптимизации // Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Системные проблемы качества, математического моделирования, информационных и электронных технологий». — М.: Радио и связь, 2003. — С. 23–28.

☎ (0742) 334-90-51;

e-mail: irbur27@mail.ru

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

МОДЕЛЬ АНАЛОГИИ МЕЖДУ МАТЕМАТИЧЕСКИМИ ДОКАЗАТЕЛЬСТВАМИ¹

А. С. Клещев

Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток

На основе расширяемой модели математической практики построена модель аналогии между доказательствами. Исходное доказательство обобщается путем замены некоторых его частей глобальными синтаксическими переменными; целевое доказательство получается из обобщения как результат применения к нему синтаксической подстановки вместо глобальных синтаксических переменных. Задачи обнаружения аналогии, построения целевого доказательства по аналогии, генерации лемм, необходимых для построения целевого доказательства по аналогии, а также генерации теорем, аналогичных исходной, состоят в поиске такой синтаксической подстановки.

ВВЕДЕНИЕ

Считается, что в своей деятельности математики почти всегда пользуются аналогией: они интуитивно обнаруживают сходство между математическими структурами на различных уровнях абстракции и опираются на него при решении новых проблем, в частности, при построении доказательств. Рассматривая те или иные свойства аналогии как существенные, авторы приходили к различным моделям аналогии между доказательствами.

В работе [1] аналогия рассматривалась как отношение между двумя теоремами, при котором имеется соответствие между множествами входящих в них символов. Модель такой аналогии строилась в виде графа соответствия между множествами символов этих теорем.

В более поздних работах аналогия рассматривалась как отношение эквивалентности: исходная теорема и ее доказательство обобщались до некоторого класса эквивалентности (два доказательства считаются аналогичными, если они входят в один и тот же класс эквивалентности). В работе [2] были введены «абстракции теорем» — операции над множеством клауз и мульти-клауз, которые сохраняют корректность при каждом применении бинарной резолюции. В работе [3] использовалась парадигма «предложения как типы», в соответствии с которой доказательства представлялись как термы. Доказательство исходной теоремы преобразуется в терм, из которого может быть получено доказательство аналогичного предложения с использованием сопоставления с образцом второго порядка, содержащим переменные функ-

циональные символы. В работе [4] основная идея состояла в том, чтобы трансформировать доказательство исходной теоремы в более общее множество доказательств. Для этого было введено понятие «наиболее общая теорема». Ее доказательство преобразуется в терм второго порядка, к которому применяется множество правил обобщения, причем функциональные и предикатные символы, входящие в исходное доказательство, используются как переменные второго порядка. В качестве альтернативной модели множества аналогичных доказательств в работе [5] использовался план доказательства, состоящий из методов, которые являются спецификациями тактик (два доказательства, построенные по одному плану, аналогичны).

С моделированием аналогии между доказательствами теорем связаны различные задачи: автоматическое обнаружение аналогии; автоматическое построение доказательства новой теоремы с помощью доказательства старой; автоматическая генерация таких лемм, что их справедливость необходима для построения доказательства новой теоремы с помощью доказательства старой; автоматическая генерация новых теорем вместе с их доказательствами, аналогичных старым теоремам. В литературе, посвященной моделированию аналогии между доказательствами, рассматривались лишь первые три задачи.

Таким образом, к настоящему времени достигнуты определенные успехи в моделировании аналогии между математическими доказательствами и в решении некоторых задач, связанных с аналогией. Однако в основе этих моделей лежит слишком грубая модель математической практики (исчисление предикатов или его модификации), что делает слишком грубой и саму модель аналогии: в одних моделях аналогичными считаются доказательства, которые отличаются друг от друга лишь используемой терминологией; в других — которые могут быть получены с помощью одних и тех же процедур, декларативное представление которых не всегда является полным; не все задачи, связанные с аналогией, могут быть удовлетворительно решены с помощью этих моделей.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 06-07-89071-а «Исследование возможностей коллективного управления в семантическом вебе информационными ресурсами различных уровней общности», и ДВО РАН в рамках Программы №15 ОЭММПУ РАН, проект «Синтез интеллектуальных систем управления базами знаний и базами данных».



В работе [6] предложена расширяемая модель математической практики (РММП), в которой семантика языка для представления математических знаний определяется содержанием базы знаний, а не исчислением. В настоящей работе на основе этой модели определяется модель аналогии между доказательствами, позволяющая поставить и решить все упомянутые выше задачи, связанные с аналогией.

1. МОДЕЛЬ АНАЛОГИИ МЕЖДУ ДОКАЗАТЕЛЬСТВАМИ

В настоящей работе, как и в ряде работ, упомянутых во Введении, аналогия рассматривается как отношение эквивалентности, а ее модель строится как обобщение доказательства исходной теоремы, т. е. как класс эквивалентности, содержащий исходное доказательство. Для построения модели аналогии вводится новый класс синтаксических переменных.

Синтаксические переменные уже использовались в РММП; их вхождение является отличительным признаком метаматематических аксиом. Областью действия каждой такой синтаксической переменной является метаматематическая аксиома, в которую эта переменная входит. Будем называть такие синтаксические переменные локальными. Локальная синтаксическая переменная заменяется подходящим значением из синтаксической подстановки при выполнении конкретизации метаматематической аксиомы на шаге доказательства. В отличие от локальных, областью действия вводимых здесь глобальных синтаксических переменных является все доказательство. Глобальные синтаксические переменные имеют те же типы, что и локальные, и такие же обозначения, с той лишь разницей, что тип глобальной переменной обозначается соответствующей прописной буквой. Таким образом, будем говорить о глобальных синтаксических переменных типа F (формулы), T (термы) и др. Глобальные синтаксические переменные, также как и локальные, могут быть модифицированы.

Назовем метарассуждением последовательность шагов (имеющую форму доказательства), в которую входит хотя бы одна глобальная синтаксическая переменная. Будем называть метадоказательством такое метарассуждение, для которого существует допустимая синтаксическая подстановка вместо глобальных синтаксических переменных, такая, что результат ее применения к метарассуждению является доказательством некоторой теоремы. Последнее означает, что все шаги полученного доказательства являются правильными применениями правил рассуждения, все утверждения, входящие в полученное доказательство, корректны, а все утверждения, относящиеся к базе знаний, в ней содержатся.

Заголовок метадоказательства будем называть метатеоремой. Математическое утверждение, получаемое из метатеоремы с помощью синтаксической подстановки, будет теоремой лишь в том случае, если расширение этой синтаксической подстановки позволяет получить доказательство этой теоремы из метадоказательства этой метатеоремы. Метадоказательство назовем обобщением исходного доказательства, если это доказательство может быть получено из этого метадоказательства при некоторой синтаксической подстановке. Два доказательства будем считать аналогичными, если они могут быть получены из одного и того же метадоказательства при разных синтаксических подстановках. Модель аналогии

сохраняет взаимно-однозначное соответствие между шагами аналогичных доказательств, а также логические и нелогические рассуждения на соответствующих шагах этих доказательств.

Пример 1. Теорема:

$$\text{последовательности} \neq \emptyset. \quad (1.1)$$

Доказательство (содержащее шаги декомпозиции и конкретизации).

Декомпозиция. Используем метаматематическую аксиому $t_1 = t_2 \ \& \ f \vdash t_2 \dashv \Rightarrow f \vdash t_1 \dashv$. Из определения: последовательности $\equiv I[1, \infty) \rightarrow R$ следует, что для доказательства (1.1) достаточно доказать

$$I[1, \infty) \rightarrow R \neq \emptyset. \quad (1.2)$$

Декомпозиция. Используем аксиому $(v_1 : S)(v_2 : S)v_1 \neq \emptyset \ \& \ v_2 \neq \emptyset \Rightarrow v_1 \rightarrow v_2 \neq \emptyset$. Для доказательства (1.2) достаточно доказать

$$I[1, \infty) \in S, \quad (1.3)$$

$$R \in S, \quad (1.4)$$

$$I[1, \infty) \neq \emptyset, \quad (1.5)$$

$$R \neq \emptyset. \quad (1.6)$$

Декомпозиция. Используем аксиому $(v : I)I[v, \infty) \in S$. Для доказательства утверждения (1.3) достаточно доказать

$$1 \in I. \quad (1.7)$$

Конкретизация. Утверждение (1.7) следует из метаматематической аксиомы $i \in I$.

Конкретизация. Утверждение (1.4) совпадает с аксиомой.

Конкретизация. Утверждение (1.5) следует из аксиомы $(v : I)I[v, \infty) \neq \emptyset$ и (1.7).

Конкретизация. Утверждение (1.6) совпадает с метаматематической аксиомой.

Пример 2. Обобщение примера 1. Метатеорема:

$$F_1 \vdash T_1 \dashv. \quad (2.1)$$

Метадоказательство.

Декомпозиция. Используем метаматематическую аксиому $t_1 = t_2 \ \& \ f \vdash t_2 \dashv \Rightarrow f \vdash t_1 \dashv$. Из утверждения базы знаний $T_1 = T_2 \vdash T_5 \vdash I, T_6 \dashv$ следует, что для доказательства (2.1) достаточно доказать

$$F_1 \vdash T_2 \vdash T_5 \vdash I, T_6 \dashv. \quad (2.2)$$

Декомпозиция. Используем утверждение базы знаний $(v_1 : T_3)(v_2 : T_4)F_2 \vdash v_1 \dashv \ \& \ F_3 \vdash v_2 \dashv \Rightarrow F_1 \vdash T_2 \vdash v_1, v_2 \dashv$. Для доказательства (2.2) достаточно доказать

$$T_5 \vdash I \in T_3, \quad (2.3)$$

$$T_6 \in T_4, \quad (2.4)$$

$$F_2 \vdash T_5 \vdash I \dashv, \quad (2.5)$$

$$F_3 \vdash T_6 \dashv. \quad (2.6)$$

Декомпозиция. Используем утверждение базы знаний $(v : I)T_5 \vdash v \dashv \in T_3$. Для доказательства утверждения (2.3) достаточно доказать $I \in I$.

Конкретизация. Утверждение (2.7) следует из метаматематической аксиомы $i \in I$.

Конкретизация. Утверждение (2.4) совпадает с утверждением базы знаний.

Конкретизация. Утверждение (2.5) следует из утверждения базы знаний $(v : I)F_2 \vdash T_5 \vdash v \dashv$ и (2.7).

Конкретизация. Утверждение (2.6) совпадает с утверждением базы знаний.

Доказательство примера 1 получается из метадоказательства примера 2 при следующей синтаксической подстановке: $I: 1$, T_1 : последовательности, $T_2: \tau_1 \rightarrow \tau_2$, $T_3: S$, $T_4: S$, $T_5: I[\tau, \infty)$, $T_6: R$, $F_1: \tau \neq \emptyset$, $F_2: \tau \neq \emptyset$, $F_3: \tau \neq \emptyset$, где τ (с индексом или без него) обозначают места вставки элементов модификатора в формулу или терм.

Пример 3. Теорема:

(x : последовательности)($a: R$)($p: R$) предел (x, a) & $a > p \Rightarrow (\exists(N: I[1, \infty))(\forall(n: I[N, \infty)) x(n) > p)$. (3.1)

(Теорема о единственности предела еще не доказана, поэтому «предел» определен как двухместный предикат.)

Доказательство (содержащее шаги вывода и применение специальных правил). Пусть

$$x^* \in \text{последовательности}, \quad (3.2)$$

$$a^* \in R, \quad (3.3)$$

$$p^* \in R. \quad (3.4)$$

Для доказательства утверждения (3.1) достаточно доказать:

$$\text{предел}(x^*, a^*) \& a^* > p^* \Rightarrow (\exists(N: I[1, \infty))(\forall(n: I[N, \infty)) x^*(n) > p^*). \quad (3.5)$$

Пусть

$$\text{предел}(x^*, a^*), \quad (3.6)$$

$$a^* > p^*. \quad (3.7)$$

Для доказательства утверждения (3.5) достаточно доказать

$$(\exists(N: I[1, \infty))(\forall(n: I[N, \infty)) x^*(n) > p^*). \quad (3.8)$$

Вывод. Используем **лемму 1**:

(x : последовательности)($a: R$)($\varepsilon: R(0, \infty)$)предел(x, a) \Rightarrow $(\exists(N: I[1, \infty))(\forall(n: I[N, \infty))|x(n) - a| < \varepsilon)$.

Пусть

$$\varepsilon^* \in R(0, \infty). \quad (3.9)$$

Из выражений (3.2), (3.3), (3.9) и (3.6) следует

$$(\exists(N: I[1, \infty))(\forall(n: I[N, \infty))|x^*(n) - a^*| < \varepsilon^*). \quad (3.10)$$

Вывод. Используем **лемму 2**:

(x : последовательности)($a: R$)($p: R$)($\varepsilon: R(0, \infty)$) $a > p$ & $(\exists(N: I[1, \infty))(\forall(n: I[N, \infty))|x(n) - a| < \varepsilon) \Rightarrow$ $(\exists(N: I[1, \infty))(\forall(n: I[N, \infty))|x(n) - a| < a - p)$.

Из выражений (3.2), (3.3), (3.4), (3.9), (3.7) и (3.10) следует

$$(\exists(N: I[1, \infty))(\forall(n: I[N, \infty))|x^*(n) - a^*| < a^* - p^*). \quad (3.11)$$

Вывод. Используем **лемму 3**:

(x : последовательности)($a: R$)($p: R$)($v_3: \{(v_1: I[1, \infty))(\forall(v_2: I[v_1, \infty))|x(v_2) - a| < a - p\}\}$)($v_4: I[v_3, \infty)$) $a > p$ & $(\exists(N: I[1, \infty))(\forall(n: I[N, \infty))|x(n) - a| < a - p) \Rightarrow$ $|x(v_4) - a| < a - p$.

Пусть

$$N^* \in \{(v_1: I[1, \infty))(\forall(v_2: I[v_1, \infty))|x^*(v_2) - a^*| < a^* - p^*)\}, \quad (3.12)$$

$$n^* \in I[N^*, \infty). \quad (3.13)$$

Из выражений (3.2), (3.3), (3.4), (3.12), (3.13), (3.7) и (3.11) следует

$$|x^*(n^*) - a^*| < a^* - p^*. \quad (3.14)$$

Вывод. Используем **лемму 4**:

(x : последовательности)($a: R$)($p: R$)($N: \{(v_1: I[1, \infty))(\forall(v_2: I[v_1, \infty))|x(v_2) - a| < a - p\}\}$)($n: I[N, \infty)$) $a > p$ & $|x(n) - a| < a - p \Rightarrow x(n) > p$.

Из выражений (3.2), (3.3), (3.4), (3.12), (3.13), (3.7) и (3.14) следует

$$x^*(n^*) > p^*. \quad (3.15)$$

Вывод. Используем **лемму 5**:

(x : последовательности)($a: R$)($p: R$)($v_3: \{(v_1: I[1, \infty))(\forall(v_2: I[v_1, \infty))|x(v_2) - a| < a - p\}\}$)($v_4: I[v_3, \infty)$) $a > p$ & $x(v_4) > p \Rightarrow (\exists(N: I[1, \infty))(\forall(n: I[N, \infty))x(n) > p)$.

Из выражений (3.2), (3.3), (3.4), (3.12), (3.13), (3.7) и (3.15) следует (3.8).

Пример 4. Обобщение примера 3. Метатеорема:

($x: T_1$)($a: T_2$)($p: T_3$) $F_1 \vdash x, a \vdash$ & $F_2 \vdash a, p \vdash \Rightarrow F_3 \vdash x, p \vdash$. (4.1)

Метадоказательство.

$$\text{Пусть } A_1 \in T_1, \quad (4.2)$$

$$A_2 \in T_2, \quad (4.3)$$

$$A_3 \in T_3, \quad (4.4)$$

Для доказательства утверждения (4.1) достаточно доказать

$$F_1 \vdash A_1, A_2 \vdash \& F_2 \vdash A_2, A_3 \vdash \Rightarrow F_3 \vdash A_1, A_3 \vdash. \quad (4.5)$$

Пусть

$$F_1 \vdash A_1, A_2 \vdash, \quad (4.6)$$

$$F_2 \vdash A_2, A_3 \vdash. \quad (4.7)$$

Для доказательства утверждения (4.5) достаточно доказать

$$F_3 \vdash A_1, A_3 \vdash. \quad (4.8)$$

Вывод. Используем утверждение базы знаний ($x: T_1$)($a: T_2$)($\varepsilon: T_4$) $F_1 \vdash x, a \vdash \Rightarrow F_4 \vdash x, a, \varepsilon \vdash$. Пусть

$$A_4 \in T_4. \quad (4.9)$$

Из выражений (4.2), (4.3), (4.9) и (4.6) следует

$$F_4 \vdash A_1, A_2, A_4 \vdash. \quad (4.10)$$

Вывод. Используем утверждение базы знаний ($x: T_1$)($a: T_2$)($p: T_3$)($\varepsilon: T_4$) $F_2 \vdash a, p \vdash$ & $F_4 \vdash x, a, \varepsilon \vdash \Rightarrow F_5 \vdash x, a, p \vdash$. Из выражений (4.2), (4.3), (4.4), (4.9), (4.7) и (4.10) следует

$$F_5 \vdash A_1, A_2, A_3 \vdash. \quad (4.11)$$

Вывод. Используем утверждение базы знаний ($x: T_1$)($a: T_2$)($p: T_3$)($v_3: T_5 \vdash x, a, p \vdash$)($v_4: T_6 \vdash v_3 \vdash$) $F_2 \vdash a, p \vdash$ & $F_5 \vdash x, a, p \vdash \Rightarrow F_6 \vdash x, v_4, a, p \vdash$.

Пусть

$$A_5 \in T_5 \vdash A_1, A_2, A_3 \vdash, \quad (4.12)$$

$$A_6 \in T_6 \vdash A_5 \vdash. \quad (4.13)$$

Из выражений (4.2), (4.3), (4.4), (4.12), (4.13), (4.7) и (4.11) следует

$$F_6 \vdash A_1, A_6, A_2, A_3 \vdash. \quad (4.14)$$



Вывод. Используем утверждение базы знаний $(x: T_1)(a: T_2)(p: T_3)(N: T_5 \vdash x, a, p \vdash)(n: T_6 \vdash N \vdash) F_2 \vdash a, p \vdash \& F_6 \vdash x, n, a, p \vdash \Rightarrow F_7 \vdash x, n, p \vdash$. Из выражений (4.2), (4.3), (4.4), (4.12), (4.13), (4.7) и (4.14) следует

$$F_7 \vdash A_1, A_6, A_3 \vdash. \quad (4.15)$$

Вывод. Используем утверждение базы знаний $(x: T_1)(a: T_2)(p: T_3)(v_3: T_5 \vdash x, a, p \vdash)(v_4: T_6 \vdash v_3 \vdash) F_2 \vdash a, p \vdash \& F_7 \vdash x, v_4, p \vdash \Rightarrow F_3 \vdash x, p \vdash$.

Из выражений (4.2), (4.3), (4.4), (4.12), (4.13), (4.7) и (4.15) следует (4.8).

Доказательство примера 3 получается из метадоказательства примера 4 при следующей синтаксической подстановке: T_1 : последовательности, T_2 : R , T_3 : R , T_4 : $R(0, \infty)$, T_5 : $\{(v_1: I[1, \infty])(\forall(v_2: I[v_1, \infty])|\tau_1(v_2) - \tau_2| < \tau_2 - \tau_3)\}$, T_6 : $I[\tau, \infty)$, F_1 : предел (τ_1, τ_2) , F_2 : $\tau_1 > \tau_2$, F_3 : $(\exists(N: I[1, \infty])(\forall(n: I[N, \infty))\tau_1(n) > \tau_2)$, F_4 : $(\exists(N: I[1, \infty])(\forall(n: I[N, \infty])|\tau_1(n) - \tau_2| < \tau_3)$, F_5 : $(\exists(N: I[1, \infty]) \times (\forall(n: I[N, \infty]) |\tau_1(n) - \tau_2| < \tau_2 - \tau_3))$, F_6 : $|\tau_1(\tau_2) - \tau_3| < \tau_3 - \tau_4$, F_7 : $\tau_1(\tau_2) > \tau_3$.

2. ОБОБЩЕНИЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВ

Обобщение доказательства состоит в замене глобальными синтаксическими переменными (возможно модифицированными) тех его частей, которые участвуют в применении правил рассуждения на каждом шаге доказательства. Те части доказательства, которые являются унифицируемыми, должны оставаться унифицируемыми и после обобщения.

Пропозициональные тавтологии и метаматематические аксиомы, входящие в доказательство, переходят в метадоказательство без изменений (они представляют правила логического и нелогического рассуждения, сохраняемые аналогией). В математических утверждениях базы знаний, применяемых в доказательстве на шагах декомпозиции и вывода и имеющих вид $(v_1: t_1) \dots (v_m: t_m) f_1 \& \dots \& f_n \Rightarrow f$, при переходе к метадоказательству термы t_1, \dots, t_m обозначаются глобальными синтаксическими переменными типа T , а формулы f_1, \dots, f_m и f — глобальными синтаксическими переменными типа F , причем если эти термы или формулы содержат вхождения свободных переменных, то обозначающие их глобальные синтаксические переменные являются модифицированными, а в качестве элементов модификаторов выступают эти свободные переменные. В математических утверждениях базы знаний, применяемых в доказательстве на шагах конкретизации и в промежуточных выводах и имеющих вид $(v_1: t_1) \dots (v_m: t_m) f$, при переходе к метадоказательству термы t_1, \dots, t_m обозначаются глобальными синтаксическими переменными типа T , а формула f — глобальной синтаксической переменной типа F . Модификация этих глобальных синтаксических переменных выполняется, как и выше. Если математическое определение унифицируется с равенством, то обе его части обозначаются разными глобальными синтаксическими переменными типа T .

3. ОБНАРУЖЕНИЕ АНАЛОГИИ И ПОСТРОЕНИЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВА ЦЕЛЕВОЙ ТЕОРЕМЫ

Метатеорема и ее метадоказательство, полученные обобщением доказательства некоторой исходной теоремы, добавляются в базу знаний подобно тому, как это делается в работе [4]. Обнаружение аналогии для новой целевой теоремы состоит из двух этапов.

На первом из них осуществляется поиск такой метатеоремы в базе знаний, для которой удастся построить синтаксическую подстановку вместо глобальных синтаксических переменных, входящих в эту метатеорему, результат применения которой к метатеореме дает целевую теорему.

На втором этапе для каждой найденной метатеоремы делается попытка построить доказательство целевой теоремы с помощью метадоказательства. Часть глобальных синтаксических переменных метадоказательства уже получили значения в результате выполнения первого этапа. Значения остальных ищутся в ходе сопоставления обобщенных математических утверждений из метадоказательства, относящихся к базе знаний, с математическими утверждениями, хранящимися в базе знаний. Если в результате этого процесса значения всех глобальных синтаксических переменных метадоказательства будут найдены, доказательство целевой теоремы будет построено.

Пример 5. Использование метадоказательства примера 4 для построения по аналогии доказательства целевой теоремы: $(x: \text{последовательности})(a: R)(p: R)$ предел $(x, a) \& a < p \Rightarrow (\exists(N: I[1, \infty]) (\forall(n: I[N, \infty]) x(n) < p))$. Сопоставление целевой теоремы с метатеоремой примера 4 позволяет определить значения следующих глобальных синтаксических переменных: T_1 : последовательности, T_2 : R , T_3 : R , F_1 : предел (τ_1, τ_2) , F_2 : $\tau_1 < \tau_2$, F_3 : $(\exists(N: I[1, \infty])(\forall(n: I[N, \infty])\tau_1(n) < \tau_2)$.

Сопоставление **леммы 1** с обобщенным утверждением, применяемым на первом шаге вывода в метадоказательстве, позволяет определить значения следующих глобальных синтаксических переменных: T_4 : $R(0, \infty)$, F_4 : $(\exists(N: I[1, \infty])(\forall(n: I[N, \infty])|\tau_1(n) - \tau_2| < \tau_3)$.

Сопоставление **леммы 6** $(x: \text{последовательности})(a: R)(p: R)(\varepsilon: R(0, \infty)) a < p \& (\exists(N: I[1, \infty])(\forall(n: I[N, \infty])|x(n) - a| < \varepsilon) \Rightarrow (\exists(N: I[1, \infty])(\forall(n: I[N, \infty]) |x(n) - a| < p - a))$ с обобщенным утверждением, применяемым на втором шаге вывода в метадоказательстве, позволяет определить значение глобальной синтаксической переменной F_5 : $(\exists(N: I[1, \infty])(\forall(n: I[N, \infty])|\tau_1(n) - \tau_2| < \tau_3 - \tau_2)$.

Сопоставление **леммы 7** $(x: \text{последовательности})(a: R)(p: R)(v_3: \{(v_1: I[1, \infty])(\forall(v_2: I[v_1, \infty])|x(v_2) - a| < p - a)\})(v_4: I[v_3, \infty)) a < p \& (\exists(N: I[1, \infty])(\forall(n: I[N, \infty])|x(n) - a| < p - a) \Rightarrow |x(v_4) - a| < p - a$ с обобщенным утверждением, применяемым на третьем шаге вывода в метадоказательстве, позволяет определить значения следующих глобальных синтаксических переменных: T_5 : $\{(v_1: I[1, \infty])(\forall(v_2: I[v_1, \infty]) |\tau_1(v_2) - \tau_2| < \tau_3 - \tau_2)\}$, T_6 : $I[\tau, \infty)$, F_6 : $|\tau_1(\tau_2) - \tau_3| < \tau_4 - \tau_3$.

Сопоставление **леммы 8** $(x: \text{последовательности})(a: R)(p: R)(N: \{(v_1: I[1, \infty])(\forall(v_2: I[v_1, \infty]) |x(v_2) - a| < p - a)\})(n: I[N, \infty)) a < p \& |x(n) - a| < p - a \Rightarrow x(n) < p$

с обобщенным утверждением, применяемым на четвертом шаге вывода в метадоказательстве, позволяет определить значение глобальной синтаксической переменной $F_7: \tau_1(\tau_2) < \tau_3$.

Сопоставление **леммы 9** (x : последовательности) ($a: R(p: R)(v_3: \{(v_1: \perp[1, \infty))(\forall(v_2: \perp[v_1, \infty)) |x(v_2) - a| < p - a\})(v_4: \perp[v_3, \infty)) a < p \& x(v_4) < p \Rightarrow (\exists(N: \perp[1, \infty) \times (\forall(n: \perp[N, \infty)) x(n) < p)$) с обобщенным утверждением, применяемым на пятом шаге вывода в метадоказательстве, позволяет завершить построение доказательства. Легко видеть, что леммы 6–9 могут быть доказаны по аналогии с леммами 2–5.

Формирование такой совокупности лемм, что доказательство теоремы состоит из шагов, на каждом из которых используется одна из них для декомпозиции или вывода, позволяет перенести смысловые части доказательства теоремы в доказательства соответствующих лемм (как в примере 5). При обобщении такого доказательства используемые леммы обобщаются «внешним» образом: сохраняется такая форма этих лемм, которая необходима для аналогии при их применении. «Внутреннее» обобщение этих лемм, получаемое на основе обобщения их доказательств, может существенно отличаться от внешнего. В этом случае аналогия между доказательствами двух теорем не требует аналогии между доказательствами соответствующих лемм; требуется лишь, чтобы форма этих лемм соответствовала внешнему обобщению. Поэтому предложенная модель аналогии является более общей, чем в работе [5].

4. ГЕНЕРАЦИЯ ЛЕММ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АНАЛОГИИ

Рассмотрим, сначала, использование полной аналогии для решения этой задачи. Если при построении доказательства целевой теоремы на основе метадоказательства для некоторого обобщенного утверждения, относящегося к базе знаний, не удается найти его конкретизацию в базе знаний, то может быть сгенерирована лемма (гипотеза), доказательство которой позволит продолжить построение доказательства целевой теоремы по аналогии. Если все глобальные синтаксические переменные, входящие в это обобщенное утверждение, уже получили значения до генерации этой леммы, то может быть сгенерирована ее точная формулировка. Если же некоторые глобальные синтаксические переменные к этому моменту еще не получили значений, то может быть сгенерирован лишь образец леммы, содержащий эти синтаксические переменные. По этому образцу пользователь, строящий доказательство целевой теоремы, должен уточнить формулировку леммы, задав значения этих синтаксических переменных. В примере 5, если лемма 6 отсутствует в базе знаний, может быть сгенерирован ее образец (x : последовательности) ($a: R(p: R)(\varepsilon: R(0, \infty)) a < p \& (\exists(N: \perp[1, \infty))(\forall(n: \perp[N, \infty)) |x(n) - a| < \varepsilon) \Rightarrow F_5 \vdash x, a, p$). Если же в базе знаний отсутствует лемма 9, то ее формулировка (а не образец) может быть сгенерирована автоматически.

Теперь рассмотрим использование частичной аналогии для генерации лемм. Предположим, что для какого-либо утверждения компонента декомпозиции некоторого шага доказательства не удалось построить его доказательство с использованием метадоказательства (в примере 1 не удалось построить доказательство утверждения (1.5) с использованием метадоказательства примера 2). Тогда из обобщенного утверждения этого компонента декомпозиции метадоказательства (обобщенного утверждения (2.5) примера 2) может быть сгенерирована лемма (или ее образец), доказательство которой может не зависеть от исходного метадоказательства. Остальная же часть доказательства целевой теоремы (за исключением доказательства сгенерированной леммы) может строиться на основе этого метадоказательства. Частичная аналогия для генерации лемм в случае вывода может использоваться способом, похожим на предложенный в работе [4].

5. ГЕНЕРАЦИЯ АНАЛОГИЧНЫХ ТЕОРЕМ И ИХ ДОКАЗАТЕЛЬСТВ

Если для заданного метадоказательства удастся найти такую синтаксическую подстановку вместо глобальных синтаксических переменных, результат применения которой к этому метадоказательству является доказательством, то результат применения этой подстановки к метатеореме является теоремой. Легко видеть, что для заданных целевого доказательства и состояния базы знаний по обобщению этого доказательства за конечное число шагов могут быть найдены все теоремы (вместе с их доказательствами), аналогичные целевой, или установлено, что таких теорем нет. Теорема примера 5 может быть сгенерирована по метадоказательству примера 4 и состоянию базы знаний, содержащему леммы 1 и 6–9.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Аналогия является одним из способов сокращения перебора при построении доказательств. Чем богаче модель математической практики, тем глубже может быть аналогия. В предложенной модели аналогии обобщение доказательств соответствует индуктивной части аналогии. Построение доказательства по аналогии и генерация аналогичных теорем соответствует ее дедуктивной части. Наконец, генерация лемм, поддерживающих построение доказательства по аналогии, соответствует ее абдуктивной части.

ЛИТЕРАТУРА

1. Owen S. Analogy for automated reasoning. — N.-Y.: Academic Press, 1990. — 770 p.
2. Plaisted D. A. Theorem proving with abstraction // AI. — 1981. — Vol. 16. — P. 47–108.
3. Boy de la Tour Th., Kreitz Ch. Building proofs by analogy via the Curry-Howard isomorphism // Proc. of LPAR. — 1992. — P. 202–213.
4. Défourneaux G., Bourelly C., Peltier N. Semantic generalizations for proving and disproving conjectures by analogy // J. of Automated Reasoning. — 1998. — Vol. 20, N 1 & 2. — P. 27–45.
5. Melis E. A model of analogy-driven proof-plan construction // Proc. of IJCAI. — 1995. — P. 182–189.
6. Гаврилова Т. Л., Клещев А. С. Внутренняя модель математической практики для систем автоматизированного конструирования доказательств теорем // Проблемы управления. — 2006. — № 4. — Ч. 1. — С. 32–35; № 5. — Ч. 2. — С. 68–73; № 6. — Ч. 3. — С. 68–71.

☎ (4232) 31-04-24;

e-mail: kleshev@iacp.dvo.ru

Статья представлена к публикации членом редколлегии О. П. Кузнецовым. □

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ ВОЙН

В. В. Цыганов⁽¹⁾, С. Н. Бухарин⁽²⁾, В. В. Васин⁽¹⁾

⁽¹⁾ *Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова, г. Москва;*

⁽²⁾ *Научно-технологический центр ФГУП «Центромашпроект», г. Москва*

Рассмотрены механизмы информационных войн, обеспечивающие гибкое взаимодействие структур агитации и пропаганды с заинтересованными лицами в борьбе за подавление соперника, овладение его капиталом и властью. Разработан интеллектуальный механизм агитации, подавляющий соперника при наличии сложного обучающегося субъекта управления — группы, состоящей из агента влияния и заинтересованных лиц, минимизирующих свои риски. Рассмотрены механизмы пропаганды, обеспечивающие распространение информации между группами и совместные действия заинтересованных лиц организации. Разработан механизм информационного противоборства, регламентирующий взаимодействие агитационных структур с заинтересованными лицами в конкурентной борьбе за влияние в организации.

ВВЕДЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Для овладения капиталом и властью широко применяются механизмы изменения общественного сознания [1]. Как показывает отечественная и зарубежная практика, эффективным средством манипулирования им является информационная война [2]. Она представляет собой взаимосвязанную совокупность специальных операций информационного воздействия на заинтересованных лиц, обеспечивающих управляемую эволюцию объекта влияния (кратко — Объекта) в направлении, благоприятном для ее инициаторов, овладение его капиталом и властью.

Заинтересованные лица — термин, вошедший в научный оборот с середины 1960-х гг. для обозначения лиц или групп, без чьей поддержки нельзя овладеть капиталом и властью [1]. В первом приближении заинтересованные лица делятся на две категории. Во-первых, существуют исполнители планов органа управления информационной войной (Центра). Это личности или группы внутри или вне организации, которые претворяют в жизнь эти планы. Они сделали ставку на ведение информационной войны, потому что это влияет на то, что они делают или будут делать. Они могут быть способными или неспособными выполнить миссию, действовать независимо или в команде. Некоторых руководителей также можно называть исполнителями, поскольку

они возглавляют организации, связанные с ведением информационной войны, и оказывают влияние на Объект.

Другие заинтересованные лица несут убытки от деятельности Объекта и получают выгоды от информационной войны. Для сохранения оптимистического настроения, будем называть их получающими выгоды. Реальным получателем выгоды может быть большая группа лиц, в частности, все граждане государства или держатели акций корпорации. Это может быть часть коллектива организации, все, кто оказывает или может оказать влияние на Объект. Часто ее составляют те, кто жаждет успеха. Они могут быть многочисленными и организованными, равнодушными, сопротивляющимися, пытающимися оказать давление, тесно связанными или расколотыми на множество фракций. Лиц, получающих выгоды, полезно классифицировать в зависимости от того, какие рычаги воздействия на Объект они имеют (или какими функциями управления им они обладают).

Система ведения информационных войн включает в себя соответствующие структуры и механизмы. К ним относятся структуры агитации и пропаганды, распространяющие информацию среди заинтересованных лиц, влияющих на эволюцию объекта информационного воздействия. Такая структура возглавляется Центром, в нее входят его агенты — агитаторы и пропагандисты. Центр может иметь в своем составе заказчика и исполнителя операций информационной войны.

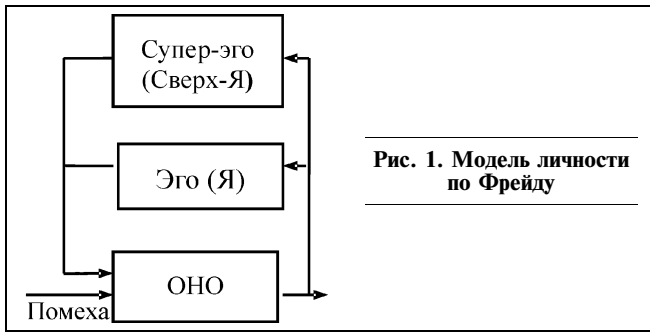


Рис. 1. Модель личности по Фрейду

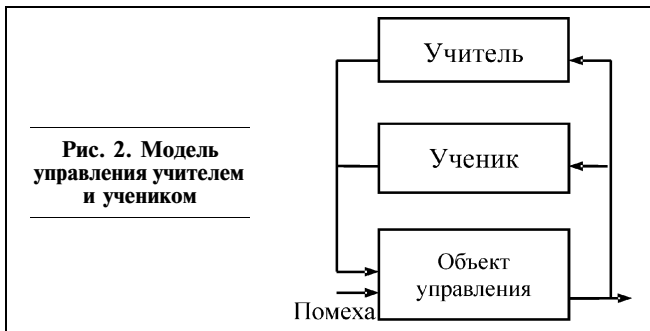


Рис. 2. Модель управления учителем и учеником

Современные информационные войны, в отличие от традиционных, проходят в условиях быстрых изменений и связанной с ними неопределенности. Каждый элемент системы формирует собственные нормы («планки ожиданий») и самостоятельно принимает решения. В настоящей работе рассматриваются модели и методы ведения информационных войн в условиях неопределенности на основе теории управления эволюцией организации [1]. Используемые в ней модели Центра, агентов и заинтересованных лиц основаны на адаптивных архетипах [1]. Проблемы их трансформации в информационных войнах рассмотрены в работе [3]. Модель самообучающегося Центра основана на адаптивном архетипе «Учелый» и исследована в работе [4]. Модели агента и заинтересованного лица основаны на модели личности по Фрейду (рис. 1). Из нее вытекает адаптивный архетип «учитель—ученик» (рис. 2), где в роли «Сверх-Я» выступает учитель, а в роли «Я» — ученик. Этот архетип использовался в работе [5] при построении механизмов управления эволюцией организации. Модель заинтересованного лица «учитель—ученик» (см. рис. 2) использовалась в работе [4] для исследования механизмов манипулирования корпорацией.

Механизмы информационных войн регламентируют функционирование элементов организационной системы — структур агитации и пропаганды и заинтересованных лиц — в борьбе за влияние на Объект. К ним относятся меха-

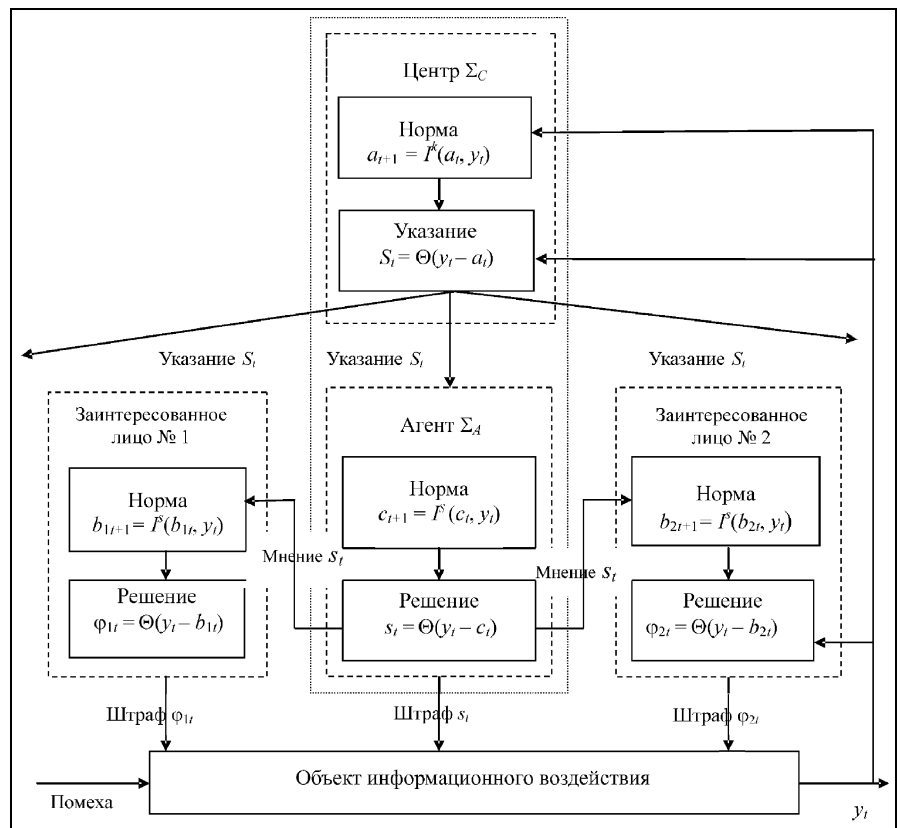
низмы агитации, пропаганды и механизмы информационного противоборства.

Механизм агитации обеспечивает изменение коллективного сознания в группе заинтересованных лиц и их воздействие на Объект в интересах Центра. Механизм пропаганды обеспечивает распространение информации между группами и взаимодействие заинтересованных лиц с Центром и его агентами при воздействии на Объект. Механизм информационного противоборства регламентирует взаимодействие элементов агитационных структур с заинтересованными лицами в борьбе за влияние.

1. ПОДАВЛЯЮЩИЕ МЕХАНИЗМЫ АГИТАЦИИ

Предположим, что деятельность Объекта наносит ущерб Центру. Этот ущерб в периоде t характеризуется показателем состояния Объекта y_t , $t = 0, 1, \dots$. Он не может быть ниже некоторой величины ξ_t , зависящей от случайных внешних факторов (например, помех): $y_t \geq \xi_t$. Цель Центра заключается в подавлении вредоносной деятельности Объекта (т. е. минимизация ущерба: $y_t = \xi_t$) путем информационного воздействия.

Рассмотрим ситуацию, когда множество заинтересованных лиц разбито на группы, в каждой из которых имеются агенты Центра. Рассмотрим трехуровневую организационную систему, включающую Центр, его агента, группу из N заинтересованных лиц и Объект, представленную на рис. 3 (для компактности показаны


 Рис. 3. Интеллектуальный механизм агитации $\Sigma^A = \{\Sigma_C, \Sigma_A\}$



только два члена группы). В этой системе выделена двухуровневая агитационная структура «Центр—агент», на верхнем уровне которой находится Центр, а на нижнем — агент, работающий в группе заинтересованных лиц. Предполагается, что истинное значение минимального ущерба ξ_t известно только Объекту. Цель заинтересованного лица — минимизировать свой риск, связанный с классификацией действий Объекта. В условиях быстрых изменений заинтересованные лица настраивают собственные нормы и самостоятельно принимают решения. Чтобы быть адекватным управляемым объектам, каждый элемент системы агитации также формирует собственные нормы и решения.

Интеллектуальный механизм агитации (ИМА) — это механизм функционирования агитационной структуры, элементы которой — Центр и агент — обучаются в режиме реального времени, гибко реагируя на изменения. В процессе информационной войны Центр, наблюдая результаты и обучаясь в условиях неопределенности, формирует указания Агенту. В свою очередь, Агент формирует собственные стимулы для Объекта и заинтересованных лиц. В результате, каждый элемент системы формирует собственные нормы и самостоятельно принимает решения.

Рассмотрим ИМА $\Sigma^A = \{\Sigma_C, \Sigma_A\}$, представленный на рис. 3. Деятельность Объекта классифицируется Центром по двум категориям. Задача синтеза подавляющего ИМА связана с минимизацией ущерба в каждом периоде (т. е. обеспечения равенства $y_t = \xi_t$, $t = 0, 1, \dots$).

Цель Центра — минимизировать риск, связанный с классификацией действий Объекта в условиях неопределенности, и при этом обеспечить подавляющий характер механизма $\Sigma^A = \{\Sigma_C, \Sigma_A\}$, стимулируя Объект к минимизации ущерба, «удовлетворительно» или «неудовлетворительно». Как показано в работе [4], для минимизации риска Центр настраивает параметр a_t решающего правила классификации с помощью процедуры самообучения

$$a_{t+1} = I^k(a_t, y_t) \quad (1)$$

(см. формулу (6) в работе [4]), причем $I^k(a_t, y_t)$ монотонно убывает по y_t :

$$I^k(a_t, y_t) \downarrow y_t \quad (2)$$

Используя параметр a_t , Центр оценивает деятельность Объекта как «удовлетворительную» ($S_t = 0$) или «неудовлетворительную» ($S_t = 1$):

$$S_t = \Theta(y_t - a_t) = \{S_t | S_t = 0, \text{ если } y_t < a_t, \text{ и } S_t = 1, \text{ если } y_t \geq a_t\}. \quad (3)$$

Содержательно, параметр a_t характеризует норму приемлемого для Центра ущерба, а величина S_t характеризует санкции Центра по отношению к Объекту. Если деятельность Объекта в периоде t признана неудовлетворительной, то санкции вводятся ($S_t = 1$), в противном случае они отсутствуют ($S_t = 0$).

Указание S_t Центра сообщается агенту влияния, выступающему в роли ученика. Действуя по обстановке, он минимизирует собственный риск, связанный с опознаванием образов и принятием решений. Как показано в работе [5], для этого ученик настраивает параметр c_t решающего правила при опознавании образов с помощью процедуры обучения с учителем:

$$c_{t+1} = I^S(c_t, y_t) \downarrow S_t \quad (4)$$

(см. формулу (8) в работе [5]), где в качестве указания учителя используется указание S_t . Агент принимает собственное решение s_t с помощью процедуры

$$s_t = \Theta(y_t - c_t) = \{s_t | s_t = 0, \text{ если } y_t < c_t, \text{ и } s_t = 1, \text{ если } y_t \geq c_t\}. \quad (5)$$

Это решение Агента s_t в виде штрафа, доводится до Объекта. Если деятельность Объекта признана Агентом удовлетворительной, то штраф отсутствует ($s_t = 0$), в противном случае он назначается ($s_t = 1$). По сути, параметр c_t характеризует норму штрафования Объекта Агентом. Далее, решение s_t доводится Агентом, в виде мнения, до N заинтересованных лиц. Каждый i -й член их группы формирует собственную норму b_{it} , используя процедуру обучения опознаванию образов, подобную процедуре (4), причем в качестве указания учителя используется мнение Агента s_t :

$$b_{it+1} = I^S(b_{it}, S_t) \downarrow s_t, \quad i = \overline{1, N}. \quad (6)$$

Содержательно, величина b_{it} характеризует норму ущерба, приемлемого для i -го заинтересованного лица. Сравнивая норму b_{it} с фактическим ущербом y_t , оно определяет стимул для Объекта:

$$\varphi_{it} = \Theta(y_t - b_{it}) = \{\varphi_{it} | \varphi_{it} = 0, \text{ если } y_t < b_{it}, \text{ и } \varphi_{it} = 1, \text{ если } y_t \geq b_{it}\}, \quad (7)$$

где $\varphi_{it} = 0$ — отсутствие штрафов (оценка «удовлетворительно»), $\varphi_{it} = 1$ — введение штрафов (оценка «неудовлетворительно»).

Со своей стороны, Объект выбирает свое состояние так, чтобы минимизировать функцию потерь $L(\cdot)$, монотонно убывающую с ростом текущих и будущих штрафов заинтересованных лиц и агента влияния:

$$L(s_t, \dots, s_{t+T}, \varphi_{1t}, \dots, \varphi_{1t+T}, \dots, \varphi_{Nt}, \dots, \varphi_{Nt+T}) \downarrow s_t, \dots, \dots, s_{t+T}, \varphi_{1t}, \dots, \varphi_{1t+T}, \dots, \varphi_{Nt}, \dots, \varphi_{Nt+T}, \quad (8)$$

где T — число учитываемых им периодов, $T = 0, 1, \dots$. Предполагается справедливость гипотезы разумности Объекта: если множество состояний, минимизирующих функцию потерь (8) в периоде t , включает ξ_t , то Объект выбирает состояние $y_t = \xi_t$.

Теорема. *Интеллектуальный механизм агитации $\Sigma^A = \{\Sigma_C, \Sigma_A\}$ является подавляющим, если:*

— Центр использует процедуру самообучения классификации (1), (2), результат которой, в виде указания S_i , (3) доводится до Агента;

— Агент использует процедуру обучения (4) с указаниями S_i Центра, а его решение, в виде s_i (5), доводится до заинтересованных лиц в качестве мнения, а до Объекта — в виде штрафа;

— i -е заинтересованное лицо использует процедуру обучения (6) с мнением Агента s_i , а его решение, в виде штрафа φ (7), доводится до Объекта.

Доказательство. С ростом показателя y_i величина S_i , определяемая согласно выражению (3), возрастает. Поскольку процедура (1) удовлетворяет условию (2), то будущие нормы ущерба a_τ убывают с ростом y_i , $\tau = \overline{i+1, t+T}$. Поэтому с ростом показателя y_i будущие величины S_τ , определяемые согласно выражению (3), монотонно возрастают. Следовательно, согласно процедуре (4), будущие нормы Агента c_τ убывают с ростом y_i , $\tau = \overline{i+1, t+T}$. Принимая во внимание монотонный рост s_i , определяемого согласно процедуре (5), с увеличением y_i , получаем, что с ростом показателя y_i будущие штрафы Объекта со стороны Агента (s_{i+1}, \dots, s_{i+T}) возрастают. Кроме того, согласно процедуре (5), текущий штраф Объекта s_i также увеличивается с ростом y_i . Поэтому, согласно выражению (6), будущие нормы $b_{i\tau}$ убывают с ростом y_i , $\tau = \overline{i+1, t+T}$. Принимая во внимание монотонность процедуры штрафования (7), получаем, что с ростом показателя y_i будущие штрафы Объекта со стороны i -го члена группы ($\varphi_{i+1}, \dots, \varphi_{i+T}$) возрастают. Кроме того, согласно выражению (7), с ростом y_i , текущий штраф φ_{ii} Объекта i -м заинтересованным лицом также возрастает.

Целевая функция Объекта (8) — монотонно убывающая функция s_τ и $\varphi_{i\tau}$, $i = \overline{1, N}$, $\tau = \overline{i+1, t+T}$. Но, как было показано, штрафы s_τ и $\varphi_{i\tau}$ — монотонно возрастающие функции ущерба y_i . Следовательно, с ростом y_i целевая функция (8) убывает. Поскольку $y_i \leq \xi_i$, то ее максимум достигается при $y_i = \xi_i$. Согласно гипотезе разумности Объекта по отношению к Центру, Объект выбирает состояние $y_i = \xi_i$. Таким образом, ИМА $\Sigma^A = \{\Sigma_C, \Sigma_A\}$ является подавляющим. ♦

Содержательно, подавляющий ИМА, удовлетворяющий требованиям теоремы, принуждает объект информационного воздействия к снижению вредной активности путем увеличения санкций и штрафов со стороны группы заинтересованных лиц с ростом ущерба системе.

2. ПОДАВЛЯЮЩИЕ МЕХАНИЗМЫ ПРОПАГАНДЫ И ТРИУМФ

Предположим теперь, что множество заинтересованных лиц включает в себя группы, в которых нет агентов Центра. Если успешная агитация в группах заинтересованных лиц, включающих в себя агентов Центра, при-

водит к распространению их взглядов (норм) на другие группы, то говорят о пропаганде. По аналогии с ИМА, подавляющий механизм пропаганды (ПМП) принуждает объект информационного воздействия к снижению вредной активности, путем увеличения санкций и штрафов со стороны множества заинтересованных лиц с ростом ущерба системе.

Рассмотрим функционирование ПМП на основе ИМА. Указания Центра доводятся до агентов, являющихся членами групп заинтересованных лиц. В свою очередь, агенты используют эти указания для обучения членов своих групп, что приводит к увеличению числа обученных. Если последние, в свою очередь, становятся агентами в других группах, то процесс становится лавинообразным. Обученный агентом ученик становится агентом Центра в другой группе, он распространяет новые нормы (ожидания), пропагандирует их.

Социальная адаптация — вид взаимодействия члена организации с Центром и социальной средой, в ходе которого согласовываются требования и ожидания элементов системы [1]. Адаптация определяется целями деятельности, нормами, способами их достижения, штрафами и санкциями за отклонение от этих норм. Центр и социальная среда воздействуют на лицо или группу в составе организации, которые воспринимают и перерабатывают эти воздействия в соответствии со своей внутренней природой. В свою очередь, член или группа активно воздействуют на Центр и среду. Отсюда адаптивная и, одновременно, адаптирующая деятельность члена или группы, которые могут быть учеником и, одновременно, Центром.

Успех при управлении эволюцией организации зависит от обучения и адаптации. Общим для механизмов агитации и пропаганды является отражение (рефлексия) в сознании заинтересованных лиц указаний Центра и мнений его агентов. Применение этих механизмов обеспечивает такое поведение заинтересованных лиц, при котором они, будучи формально независимыми, принимают решения в интересах Центра. Когда Центр и его агенты наказывают Объект, заинтересованные лица умоляют эти наказания.

На практике, Центр и его агенты выигрывают, если принятый план выполняется, и проигрывают или теряют время, если план неудачен. Потенциальные их союзники из числа заинтересованных лиц решают вступить в информационную войну, когда они начинают верить, что план будет удачным. Реально выполнимые планы увлекают членов организации, изменяя их нормы и ожидания, и приводят к эффекту триумфа. Этот эффект хорошо известен в различных областях человеческой деятельности. Некоторые исследователи присваивают ему собственные названия, исходя из важности выбранного ими фактора в цепочках причинно-следственных связей, приводящих к его возникновению: рефлексии, момента движения, умножения и др. [1]. Называя этот эффект рефлексией, можно говорить о лицах, подверженных в своих решениях пристрастиям и эмоциям. Обучающиеся заинтересованные лица накапливают знания, но другие лишены такой возможности. В своих решениях они учитывают свои суждения о будущем, и их пристрастное отношение влияет на сам результат. В свою очередь, он



усиливает или ослабляет пристрастное отношение, на которое они опирались при принятии решений. Как было показано в работе [1], наиболее простой вид манипулирования — это эмоциональное воздействие на пристрастия обучаемых. Пристрастность делает их удобным объектом манипулирования через эмоции.

Триумф имеет место, когда все у большего количества заинтересованных лиц возникает убеждение, что выбран верный план действий, что данный Объект должен быть подавлен. Конечно, могут возникать конфликты, противоположные взгляды и расхождения. Но общее убеждение неизбежности того, что должно произойти, становится все более распространенным и поэтому все более важным. Оно набирает силу, так как каждый начинает считаться с этим и действовать соответственно.

В информационной войне эффект триумфа важен потому, что он становится силой общего убеждения, переходящей в действие, придает силы и авторитет исполнителю и заказчику информационных операций. Триумф особенно важен в ситуациях нерешительности, когда возможны различные курсы действий. Восприятие убедительности плана зависит от знаний, поддержки влиятельных групп, эффективности структур и механизмов агитации и пропаганды. Знание само по себе редко бывает достаточным, чтобы убедить заинтересованных лиц. Но оно дает авторитет структурам агитации и пропаганды, основу для доверия, необходимого для объединения.

3. МЕХАНИЗМЫ ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОТИВОБОРСТВА

Ситуация, рассмотренная в § 1 и 2, характерна для полного информационного, финансового, идеологического и иного превосходства инициатора информационной войны. Такая ситуация имела место, например, в процессе первых «цветных революций» на постсоветском пространстве. Сегодня сложилась иная ситуация. По мере овладения капиталом и властью возникают новые центры влияния. В информационных войнах, как правило, участвуют не менее двух центров информационного противоборства.

Рассмотрим организационную систему, включающую в себя противоборствующие центры с их агентами, группу из N заинтересованных лиц и Объект, представленную на рис. 4 (для компактности, изображен только один член группы). Интеллектуальный механизм информационного противоборства (ИМИП) предполагает обучение и гибкое реагирование элементов систем агитации «центр—агенты» в борьбе с соперником за влияние на Объект. Формально, ИМИП включает в себя ИМА Центра $\Sigma^A = \{\Sigma_C, \Sigma_A\}$ и ИМА его Соперника $\Sigma^C = \{\Sigma_{CC}, \Sigma_{AC}\}$ и обозначается как $\Sigma = \{\Sigma^A, \Sigma^C\} = \{\{\Sigma_C, \Sigma_A\}, \{\Sigma_{CC}, \Sigma_{AC}\}\}$. Как и ранее, целью Центра является подавление Объекта. Назовем агитацию Соперника неэффективной, если нормы заинтересованных лиц не зависят от мнения r_i его агента:

$$b_{i+1} = I^S(b_{ii}, s_i, r_i) = I^S(b_{ii}, s_i), \quad i = \overline{1, N}. \quad (9)$$

Следствие. Если выполняются условия теоремы, агитация Соперника неэффективна и функция потерь Объекта $L^*(\cdot)$ не зависит от штрафов его агента:

$$L^*(\cdot) = L^*(\varphi_{1t}, \dots, \varphi_{1t+T}, \dots, \varphi_{Nt}, \dots, \varphi_{Nt+T}) \downarrow \varphi_{1t}, \dots, \varphi_{1t+T}, \dots, \varphi_{Nt}, \dots, \varphi_{Nt+T} \quad (10)$$

то интеллектуальный механизм информационного противоборства $\Sigma = \{\Sigma^A, \Sigma^C\}$ является подавляющим.

Доказательство немедленно следует из теоремы, если учесть, что, во-первых, агент Соперника не влияет на функцию потерь Объекта (10) и, во-вторых, по условию следствия, он не влияет на нормы заинтересованных лиц, определяемые по формуле (9). Следовательно, воздействие ИМИП $\Sigma = \{\Sigma^A, \Sigma^C\}$ на Объект эквивалентно воздействию ИМА $\Sigma^A = \{\Sigma_C, \Sigma_A\}$. Поскольку выполняются все условия теоремы, то ИМА $\Sigma^A = \{\Sigma_C, \Sigma_A\}$ — подавляющий. Следовательно, ИМИП $\Sigma = \{\Sigma^A, \Sigma^C\}$ также подавляющий. ♦

Содержательно, условие (9) может выполняться, если агент Соперника не пользуется авторитетом среди заинтересованных лиц, например, из-за личных качеств, непопулярности самого Соперника, его идеологии, заказчиков и исполнителей его операций и т. д. Функция потерь Объекта приобретает вид (10), если число N заинтересованных лиц достаточно велико, так что штрафы агента не имеют существенного значения для Объекта, и не влияют на его поведение. При этом оппонент в информационной войне фактически отсутствует, и механизм противоборства превращается в подавляющий механизм агитации. Это возможно, если нет заказчика или исполнителя информационных операций. Тогда подавляющий механизм агитации становится средством информационной агрессии против Объекта, являющегося противником Центра. Например, в период, предшествующий развалу СССР, не было ни заказчика, ни исполнителя операций противоборства с западными структурами агитации и пропаганды, обладающими

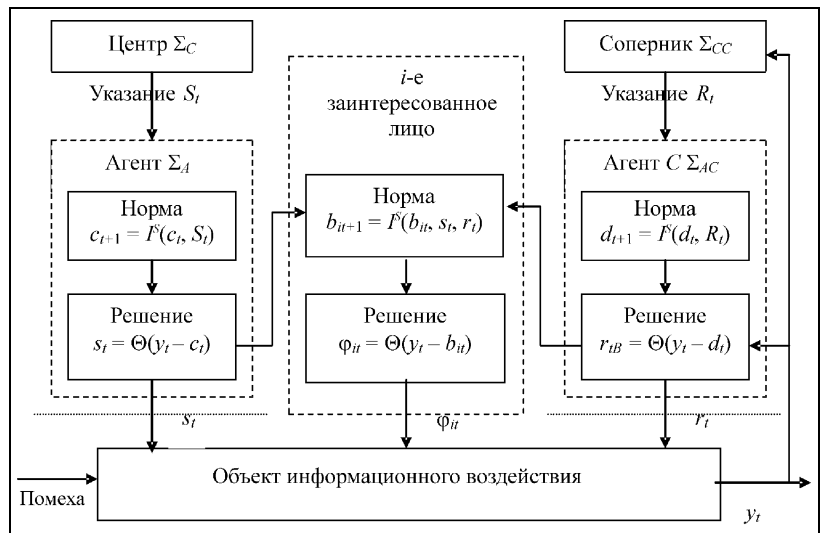


Рис. 4. Механизм информационного противоборства $\Sigma = \{\Sigma^A, \Sigma^C\} = \{\{\Sigma_C, \Sigma_A\}, \{\Sigma_{CC}, \Sigma_{AC}\}\}$

практически неограниченными финансовыми ресурсами, и их агентами влияния внутри страны. Поэтому применялся механизм информационной агрессии. Как показывает практика, для противоборства с западными структурами агитации и пропаганды, обладающими неограниченными финансовыми ресурсами, должны использоваться культурные ресурсы цивилизаций [6].

Роль неформальных структур в информационном противоборстве. Эволюция организации, состоящей, в большинстве своем, из обучаемых заинтересованных лиц (учеников), построена на указаниях локальных центров агитации, мнениях и действиях авторитетных агентов влияния (учителей). Обучение приводит к адаптации и триумфу новой идеи. Для этого наиболее активные члены организации объединяются в неформальные структуры. Их ценность в информационном противоборстве определяется способностью осуществлять обучение, объединять в единое целое заинтересованных лиц. Неформальные структуры обеспечивают каналы коммуникаций. Обсуждение в них — это использование разных каналов для общения с людьми, контакт с которыми затруднен в иерархической системе. Неформальные структуры состоят из лиц одинаковых убеждений, которые решают схожие проблемы, преследуют одинаковые цели или имеют общие интересы. Это обучающие структуры, невидимые университеты. Для информационного противоборства необходимы люди, которые могут действовать, которые не считают, что они должны всегда проявлять осторожность и выжидать.

Неформальные структуры зависят от обменов и стимулов. Они существуют, потому что полезны. Обсуждение подразумевает обмен услугами. Чтобы получить, необходимо дать что-то взамен. Политика «ты мне — я тебе» часто служит основой деятельности таких структур. Они стремятся фокусировать внимание на избранных задачах. Неформальные структуры можно использовать для агитации и пропаганды, они — опора в информационном противоборстве. В сложных ситуациях побеждает тот, кто может их объединить.

Адаптация и триумф основаны на внедрении новой идеологии как совокупности указаний авторитетного Центра. На первом этапе противоборства организация с централизованным управлением, формально находящаяся под контролем «старой» формальной структуры, преобразуется с помощью новой идеологии в коллектив, состоящий в большинстве своем из учеников, обучаемых новой неформальной структурой. На втором этапе эволюция организации построена на указаниях агентам-членам неформальной структуры, исходящих из Центра, выдвинувшего новую идеологию. Эти указания доводятся до групп заинтересованных лиц в виде мнений работающих в них агентов влияния. На третьем этапе новая идеология распространяется среди других членов организации. Триумф в организации достигается работой иерархической системы локальных центров агитации и пропаганды, контролируемых членами неформальной структуры, которые осуществляют обучение заинтересованных лиц. В этой ситуации центр неформальной

структуры фактически становится управляющим органом. Механизм влияния этой структуры основан на координации действий ее членов, использующих механизмы агитации в группах (см. рис. 3). При этом агент является членом неформальной структуры, обучаемым ее Центром. В свою очередь, члены структуры — ученики — обучаются агентом. Их решения оказывают комплексное воздействие на объект информационного воздействия, управляя его эволюцией. Таким образом, эффективная неформальная структура с идеологией, основанной на последовательности указаний Центра, приводит к адаптации и триумфу и, как следствие, к победе в информационном противоборстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Информационные войны являются эффективным средством овладения капиталом и властью. Механизмы агитации, пропаганды и информационного противоборства обеспечивают взаимодействие заинтересованных лиц в борьбе за влияние в организации. Важную роль в них играют процедуры обучения. Для успешного обучения и управления необходимы инструменты изменения сознания заинтересованных лиц — структуры агитации и пропаганды, состоящие из агентов влияния, работающих в группах. Они используют механизмы агитации и пропаганды для адаптации заинтересованных лиц, умножения усилий и достижения эффекта триумфа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цыганов В. В., Бородин В. А., Шишкин Г. Б. Интеллектуальное предприятие: механизмы овладения капиталом и властью. — М.: Университетская книга, 2004. — 776 с.
2. Бухарин С. Н. Основы теории распространения информации при информационных войнах в бизнесе // Информационные войны. — 2006. — № 1. — С. 43—59.
3. Бухарин С. Н. Проблемы трансформации адаптивных архетипов при организации информационного противоборства // Там же. — С. 75—97.
4. Агеев И. А., Гурлев И. В., Цыганов В. В. Механизмы манипулирования корпорацией // Проблемы управления. — 2004. — № 3. — С. 34—38.
5. Агеев И. А., Ермошкин А. И., Цыганов В. В. Механизмы технократического управления эволюцией организации // Там же. — № 2. — С. 40—44.
6. Цыганов В. В. Эволюция цивилизаций // Информационные войны. — 2006. — № 1. — С. 15—31.

☎ (095) 334-79-00;

e-mail: bbc@ipu.ru

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



СЦЕНАРНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ КАК ИНСТРУМЕНТ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ЭКОНОМИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ¹

А. Ф. Кононенко, В. В. Шевченко

Вычислительный центр РАН, Москва

Кратко описан класс теоретико-игровых моделей (операционных игр), позволяющих на практике эффективно применять сценарное планирование. Рассмотрены принципы и процедуры его применения для игрового операционного моделирования социально-экономических процессов. Предложена базовая макроэкономическая модель социально-экономического развития государства.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы сценарное планирование стало широко применяться как инструмент качественного решения задач социально-экономического характера. При этом, однако, не выработаны строгие определения базовых понятий сценарного планирования: понятий сценарного условия, сценария, сценарного плана. В работе представлена попытка точного определения этих понятий на базе представлений математической теории игр и определения принципов применения сценарного планирования для решения теоретико-игровых задач, формализующих весьма широкий класс задач экономического управления.

При формализации задач экономического управления с использованием теоретико-игровых моделей ([1–4] и многие др.) исходя из конкретной задачи определяются субъекты рассматриваемого производственно-экономического процесса (игроки), их функции полезности (функционалы), контролируемые ими управления, параметры и неуправляемые игроками факторы игрового взаимодействия. Выписываются соотношения, связывающие управления игроков с неуправляемыми факторами и параметрами модели. Выявляются имеющие место неопределенности. Выделяется оперирующая сторона (главный игрок), в интересах которой проводится исследование. Игровые модели могут быть статическими и динамическими.

При решении теоретико-игровых задач делаются те или иные предположения о стратегиях поведения игроков, отличных от главного, и, возможно, о реализации тех или иных неопределенностей, в результате чего иг-

ровая задача сводится к задаче оптимального управления. Решение последней позволяет выработать рациональную стратегию поведения оперирующей стороны.

1. ОПЕРАЦИОННЫЕ ИГРЫ

Из известных теоретико-игровых моделей наиболее удобными для применения сценарного планирования при решении игровых задач представляются операционные игры, основанные на формализации в терминах математической теории игр основных понятий аналитического бухгалтерского учета (счет, проводка хозяйственной операции, хозяйствующий субъект, актив, пассив, корреспонденция счетов и др.) [4].

Хозяйствующие субъекты (экономические агенты) формализуются в операционных играх как игроки (субъекты). Счета и проводки получают строгие математические определения. Базовые счета описывают состояния субъектов и делятся на активные, пассивные, активно-пассивные и забалансовые. Обороты и сальдо аналитических счетов в общем случае являются производными функциями оборотов и сальдо базовых и других аналитических счетов. Операции описываются их множествами ЛПР (лиц, принимающих решения) и проводок и функциями синтеза решений по выбору значений параметров операции, исходя из выборов субъектов, входящих в множество ЛПР операции. Обязательства субъектов формализуются в форме логических предложений вида ЕСЛИ «А» ТО «В» ИНАЧЕ «С», где «А», «В» и «С» — логические предложения с термами в виде равенств и неравенств с участием сальдо и оборотов счетов и выборов субъектов.

Над операционными играми определяются операции:

- агрегирования счетов некоторого субъекта игры OPG_0 ;
- объединения операций игры OPG_0 ;

¹ Работа рекомендована к печати Программным комитетом Третьей международной конференции по проблемам управления (Москва, 20–22 июня 2006 г.).

- свертки вектора управления субъекта в операции игры OPG_0 ;
- агрегирования отличных от оперирующей стороны субъектов игры OPG_0 .

Любая из этих операций, равно как и любая последовательность таких операций, трансформирует операционную игру OPG_0 в операционную игру OPG_1 . При этом в силу специфики операционных игр наряду со строго формальными процедурами агрегирования счетов, операций, субъектов и их управлений возможно применение и неформальных процедур агрегирования, при которых описание игрового процесса принятия решений по проведению операций выстраивается в агрегированной игре OPG_1 заново из содержательных сообщений без строго логической трансляции этого описания исходной, не агрегированной игры OPG_0 .

2. СЦЕНАРНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ КАК ИНСТРУМЕНТ РЕШЕНИЯ ИГРОВЫХ ЗАДАЧ

Сценарным условием (СУ) назовем любое выраженное математически предположение о поведении одного или нескольких неосновных игроков или о реализации неопределенных факторов. Сценарные условия могут связываться логическими операциями «и», «или», «не», образуя при этом новые сценарные условия.

Сценарное условие назовем *полным сценарным условием (ПСУ)*, если его принятие в виде ограничения на реализацию рассматриваемого игрового процесса достаточно для сведения игровой задачи к оптимизационной.

Совокупность полного сценарного условия и соответствующей ему оптимальной стратегии основного игрока в операционной игре назовем *сценарием (СЦ)*, а множество сценариев, покрывающих многообразие вариантов развития событий, — *сценарным планом (СЦП)*.

Рассмотренные понятия (СУ, ПСУ, СЦ и СЦП) могут служить основой для решения многих практических задач, формализуемых в виде задач математической теории игр. Решение таких задач в возникающих при формализации весьма сложных математических постановках, как правило, сталкивается с непреодолимыми трудностями математического и вычислительного характера. При их формализации в операционной теоретико-игровой постановке и при гибком использовании сценарного планирования для сужения множества вариантов развития игрового процесса эти непреодолимые трудности удается избежать. Сформулированные на содержательном уровне предположения о стратегии поведения того или иного субъекта (модели поведения субъектов) достаточно естественно представляются в виде совокупностей логических высказываний о том, как он будет выбирать свои управления в тех операциях, в множествах ЛПР которых он присутствует. Каждое такое логическое высказывание представляет собой СУ и сужает многообразие вариантов развития игрового процесса. Вполне аналогично формируются СУ, связанные с теми или иными предположениями о реализации неопределенностей. Учет каждого СУ упрощает игровую постановку задачи; учет совокупности СУ, составляющих ПСУ, сводит эту задачу к оптимизационной, которая

может решаться с помощью имеющихся пакетов оптимизационных математических подпрограмм. Таким образом, сложная игровая задача разбивается на соответствующие различным ПСУ вполне поддающиеся решению задачи оптимизационные.

Весьма большое значение при решении практических задач экономического характера имеют также вопросы агрегирования. Предлагаемый операционно-сценарный подход к решению таких задач позволяет существенно продвинуться и в решении этих вопросов, сделав процедуры агрегирования значительно более простыми и естественными.

Рассмотрим основную идею агрегирования в операционных играх с использованием понятий СУ, ПСУ, СЦ и СЦП.

Пусть игра OPG_1 является игрой, возникшей из игры OPG_0 после конечного числа агрегирований счетов и отличных от оперирующей стороны субъектов, объединений операций и свертки управлений игроков в операциях, что далее будет обозначаться $OPG_0 > OPG_1$. И пусть заданы сценарные условия SC_1 и SC_0 для игр OPG_1 и OPG_0 , соответственно. Будем говорить, что условие SC_0 соответствует условию SC_1 , если из выполнения условия SC_0 логически следует выполнение условия SC_1 , и обозначать это $SC_0 \Rightarrow SC_1$.

Вполне аналогично понятию соответствия между сценарными условиями может быть определено понятие соответствия между сценариями исходной и агрегированной операционных игр, каждый из которых описывается неким ПСУ и соответствующей данному ПСУ оптимальной стратегией оперирующей стороны. Пусть для операционных игр OPG_0 и OPG_1 таких, что $OPG_0 > OPG_1$ заданы полные сценарные условия FSC_0 и FSC_1 , соответственно, причем $FSC_0 \Rightarrow FSC_1$. Пусть при этом STR_0 и STR_1 — оптимальные стратегии оперирующей стороны в играх OPG_0 и OPG_1 в силу полных сценарных условий FSC_0 и FSC_1 , соответственно. Если при всем сказанном из следования оперирующей стороной в игровом процессе игры OPG_0 стратегии STR_0 и выполнения полных сценарных условий FSC_0 и FSC_1 в играх OPG_0 и OPG_1 и в силу взаимосвязи между рассматриваемыми играми ($OPG_0 > OPG_1$) логически следует, что оперирующая сторона в игровом процессе игры OPG_1 будет следовать стратегии STR_1 и ожидаемые выигрыши оперирующих сторон игр OPG_0 и OPG_1 при этом равны, то будем говорить, что сценарный план (FSC_0, STR_0) игры OPG_0 соответствует сценарному плану (FSC_1, STR_1) игры OPG_1 и обозначать это $(FSC_0, STR_0) \Rightarrow (FSC_1, STR_1)$.

Исходя из определенных понятий соответствия сценарных условий и сценариев может быть доказано следующее утверждение.

Утверждение 1. Пусть имеются операционные игры OPG_0 и OPG_1 такие, что $OPG_0 > OPG_1$, и полные сценарные условия для этих игр FSC_0 и FSC_1 такие, что $FSC_0 \Rightarrow FSC_1$. Пусть при этом STR_0 и STR_1 — оптималь-



ные стратегии оперирующей стороны в играх OPG_0 и OPG_1 в силу полных сценарных условий FSC_0 и FSC_1 соответственно. Тогда сценарный план (FSC_0, STR_0) игры OPG_0 соответствует сценарному плану (FSC_1, STR_1) игры OPG_1 — $(FSC_0, STR_0) \Rightarrow (FSC_1, STR_1)$. ♦

Доказательство данного утверждения в силу отсутствия в данном тексте точных определений и свойств перечисленных выше операций агрегирования счетов, операций, субъектов в операционных играх опустим.

Утверждение 1 может применяться как для построения новых, так и для проверки корректности имеющихся макроэкономических моделей. Действительно, микроэкономическое операционное игровое описание той или иной экономической системы может быть получено из реальной бухгалтерии составляющих эту систему микроагентов (предприятий, домашних хозяйств, корпораций и т. д.). Последовательное применение к этому микроописанию процедур агрегирования счетов и отличных от оперирующей стороны субъектов, объединения операций и свертки управлений субъектов в операциях позволяет выстраивать различные корректные макроописания.

При этом базовым примером построения таких макроописаний может служить рассмотренная далее базовая макроэкономическая модель социально-экономического развития государства. Другие макроэкономические модели (региональные, геополитические) могут строиться аналогично с соответствующей поставленной задаче коррекцией процедур агрегирования.

3. БАЗОВАЯ МАКРОЭКОНОМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Приняв в качестве оперирующей стороны то или иное государство, совокупность экономически значимых для экономики данного государства микроагентов можно разделить на множества:

- резидентных (состоящих из граждан рассматриваемого государства) домашних хозяйств;
- резидентных (зарегистрированных как резидентные юридические лица данного государства) предприятий;
- органов власти данного государства;
- нерезидентов данного государства.

Избегая излишней детализации, но, не теряя при этом целостности экономического описания рассматриваемых микроагентов, состояние каждого из них можно описывать следующим множеством счетов.

Балансовые счета:

Активные счета

- материальные ценности (МЦ) (в стоимостных объемах по текущим ценам спроса на текущем базисе поставки в оговоренной для данной модели базовой валюте) с субсчетами средств производства (СП), амортизации средств производства (АМСП), предметов потребления (ПП), сырья и полуфабрикатов (СЫР);
- нематериальные активы (НМА);
- дебиторская задолженность (ДЗ) с субсчетами дебиторских задолженностей конкретных микроагентов.

Пассивные счета

- акционерный капитал (АК);
- кредиторская задолженность (КЗ) с субсчетами кредиторских задолженностей перед конкретными микроагентами;
- прибыль (убыток) (ПРУБ) за все предыдущее время.

Забалансовые счета:

- процент акций (АКЦ) других микроагентов в пакете акций данного микроагента с субсчетами процентов акций каждого из них;
- стоимость природных ресурсов (ПР), которыми располагает микроагент;
- численность людских ресурсов (ЛР) (состава семьи или персонала), которыми располагают микроагенты, с субсчетами работоспособных и неработоспособных мужчин и женщин;
- средний уровень квалификации людских ресурсов (КВЛР) с субсчетами средних уровней квалификации мужчин и женщин;
- средний уровень здоровья людских ресурсов (ЗДОР);
- средний уровень просвещенности людских ресурсов (ПРОС).

Аналитические счета:

- функционалы (Ф) микроагентов (наиболее естественным представляется определить функционал микроагента как его обобщенные чистые активы, учитывающие как балансовые активы и пассивы, так и сопоставимые с ними оценки природных и людских ресурсов);
- функционал оперирующей стороны (ФОС), который естественно определить в виде суммы функционалов резидентных микроагентов;
- квалификационные потенциалы людских ресурсов (КВП) субъектов, определяемые как суммы уровней квалификации составляющих эти ресурсы людей.

При этом микроагенты не обязательно используют все перечисленные счета.

Исходя из реальной производственно-экономической деятельности и ее бухгалтерского учета, нетрудно также определить перечень экономически значимых типов операций, которые могут (в принципе) проводить в одиночку или группой рассматриваемые микроагенты (при этом некоторым микроагентам могут быть свойственны не все из перечисленных ниже операций):

- *производственные* (дебетуют на сумму произведенных МЦ (при производстве СП) и кредитуют на сумму амортизации (всегда) субсчет СП; кредитуют на сумму используемых сырья и материалов субсчет СЫР; занимают на время операции (кредитуют в начале и дебетуют в конце операции) определенную сумму субсчета СП; кредитуют забалансовый счет ПР (при операциях добычи на уменьшение природных запасов, при всех операциях на сумму экологического ущерба от операции); дебетуют (при производстве ПП) субсчет ПП; занимают на время операции (кредитуют в начале и дебетуют в конце операции) определенную сумму аналитического счета квалификационного потенциала субъекта (соответствующую ис-

- пользуемым людским ресурсам с учетом их квалификации); кредитуют на сумму финансовых затрат (оплата труда и др.) счет ДЗ);
- *модернизационные* (улучшают основные характеристики производственных операций (трудоемкость, фондоемкость, материалоемкость, энергоемкость, экологическая чистота), кредитуют на сумму амортизации субсчет СП; кредитуют на сумму используемых сырья и материалов субсчет СЫР; занимают на время операции определенную сумму субсчета СП; кредитуют забалансовый счет ПР на сумму экологического ущерба от операции; занимают на время операции определенную сумму аналитического счета квалификационного потенциала субъекта; кредитуют на сумму финансовых затрат (оплата труда и др.) счет ДЗ);
 - *потребительские* (кредитуют субсчет ПП на сумму потребления, обеспечивают существование ЛР и самих субъектов, проведение всех видов операций; препятствуют уменьшению сальдо счетов ЛР и ЗДОР в результате недостаточного потребления);
 - *купли-продажи* (поставки) продукции и услуг (операции, изменяющие состояния счетов двух субъектов-участников операции (продавца (поставщика) и покупателя (заказчика)); счет МЦ (один или несколько из его субсчетов) кредитуется у продавца и дебетуется у покупателя; у покупателя кредитуется, а у продавца дебетуется счет ДЗ; у продавца дебетуется или кредитуется счет ПРУБ);
 - *переоценки МЦ* (операции, изменяющие состояния счетов МЦ и их субсчетов в связи с изменением цен спроса);
 - *кредитования* (операции, изменяющие состояния счетов двух субъектов-участников операции (кредитора и заемщика); у заемщика кредитуется на сумму кредита счет КЗ и дебетуется на ту же сумму счет ДЗ, у кредитора дебетуется на сумму кредита счет ДЗ и кредитуется на ту же сумму счет КЗ; возникает обязательство по оплате заемщиком кредитору процентов по кредиту);
 - *инвестирования* (операции, изменяющие состояния счетов двух субъектов-участников операции (инвестора и инвестируемого); у инвестора кредитуется на сумму инвестиций счет ДЗ и дебетуется на ту же сумму счет прибыли; у инвестируемого, наоборот, дебетуется на сумму инвестиций счет ДЗ и кредитуется на ту же сумму счет прибыли; субсчет процента акций инвестора в акционерном капитале инвестируемого (процента, порождающего обязательство по отчислению доли прибыли инвестируемого инвестору) дебетуется на согласованный в процессе операции процент акций, получаемый инвестором за инвестиции в пакете акций инвестируемого (процент, порождающий обязательство по отчислению доли прибыли);
 - *найма-увольнения* (операции, изменяющие состояния счетов ЛР и КВЛР микроагента-работодателя и порождающие (при найме) или аннулирующие (при увольнении) обязательство этого субъекта по оплате труда нанятого (увольняемого) микроагента-работника и обязательство последнего по выполнению работ), проведение операций найма ограничено требованием наличия у нанимаемого микроагента необходимого рабочего времени;
 - *налоговые* (операции, изменяющие состояния счетов двух субъектов-участников операции: получателя (орган власти) и плательщика (предприятие или домашнее хозяйство) налогов; налоговые операции могут быть двух видов: начисления и оплаты налогов; при начислении налогов у получателя дебетуется на сумму начисленных налогов счет ДЗ, у плательщика кредитуется на сумму начисленных налогов счет КЗ; при оплате у получателя дебетуется на сумму полученных налогов счет КЗ и кредитуется на ту же сумму счет ДЗ, у плательщика кредитуется на сумму оплаченных налогов счет ДЗ и дебетуется на ту же сумму счет КЗ);
 - *НИОКР* (дебетуют счет НМА (нематериальных активов); занимают на время операции определенную сумму аналитического счета квалификационного потенциала микроагента; кредитуют на сумму финансовых затрат счет ДЗ);
 - *обучающие* (дебетуют забалансовый счет КВЛР и его субсчета; занимают на время операции определенную сумму аналитического счета квалификационного потенциала субъекта (труд учителей); кредитуют на сумму финансовых затрат счет ДЗ);
 - *просветительские* (дебетуют счет ПРОС и его субсчета; занимают на время операции определенную сумму аналитического счета квалификационного потенциала (труд просветителей; кредитуют на сумму финансовых затрат счет ДЗ);
 - *здравоохранительные* (дебетуют счет ЗДОР и его субсчета; занимают на время операции определенную сумму аналитического счета квалификационного потенциала (труд работников здравоохранения); кредитуют на сумму финансовых затрат счет ДЗ);
 - *демографические* (дебетуют (рождение) или кредитуют (смерть) забалансовый счет ЛР и его субсчета);
 - *природоохранные* (дебетуют счет ПР; кредитуют на сумму амортизации субсчет СП; кредитуют на сумму используемых сырья и материалов субсчет СП; занимают на время операции определенную сумму субсчета СП; занимают на время операции определенную сумму аналитического счета квалификационного потенциала; кредитуют на сумму финансовых затрат счет ДЗ);
 - *социальные* (проводятся органом власти или предприятием по отношению к домашнему хозяйству; кредитуют на сумму социальных выплат (пенсии, пособия, льготы) счет ДЗ органа власти или предприятия; дебетуют на ту же сумму счет прибыли домашнего хозяйства).

Операций каждого типа много. Они отличаются характеристиками и участвующими в них микроагентами. Производственные операции разделяются на производство СП и производство ПП, причем и те и другие могут иметь разные характеристики и проводиться разными микроагентами. Модернизационные операции по характеру разделяются по тому, какие характеристики (трудоемкость, фондоемкость, материалоемкость, сырьемкость и экологичность) каких производственных операций они улучшают и также могут иметь различные



характеристики и проводиться различными микроагентами. Характеристики модернизационных операций при этом зависят от имеющихся у субъекта нематериальных активов, накапливаемых в результате проведения НИОКР. И так далее.

Множества ЛПР каждого из рассмотренных выше типов операций достаточно очевидны. Для производственных и модернизационных операций, проводимых одним предприятием, множество ЛПР состоит из самого этого предприятия. Если такая операция проводится группой предприятий, они и составляют ее множество ЛПР. В операциях купли-продажи, кредитования, инвестирования, налоговых операциях множество ЛПР состоит из двух микроагентов — участников операции. И т. д.

Функции свертки операций при разной глубине моделирования будут иметь разную сложность. При этом различные виды функций свертки могут моделировать различную психологию поведения микроагентов, различные традиции коллективного поведения и т. п. Для операций, множество ЛПР которых состоит из одного субъекта, функция свертки тривиальна — управление операции определяет этот субъект. Для иных операций в простейшей модели можно считать, что каждый субъект из множества ЛПР операции дает свой вариант вектора управления операции и каждая координата этого вектора определяется как минимум из предложений субъектов по этой координате.

Естественный переход от рассмотренной выше микрооперационной модели к макромоделю можно осуществить, не меняя описанного выше плана счетов (без агрегирования счетов) путем агрегирования микроагентов каждого типа (домашние хозяйства, предприятия, органы власти, нерезидентные микроагенты) в соответствующего макроагента (экономического агента) с проведением традиционной для экономики процедуры осреднения тех объединений операций и сверток управлений субъектов, которые при этом возможны. В результате число субъектов операционной игры сокращается до четырех: *государство* (Г), *предприятия* (П), *домашние хозяйства* (ДХ), *внешний мир* (ВМ). Счета этих субъектов соответствуют счетам национального счетоводства. Число рассматриваемых операций становится вполне обозримым.

Например, производственные и модернизационные операции проводят субъекты П и ВМ. Каждый из них имеет в каждый момент времени свои, полученные путем осреднения, характеристики производственных и модернизационных операций. В связи с чем в множество операций операционной модели необходимо включить 6 типов производственных и 6 типов модернизационных операций (внутри каждого типа следует рассматривать достаточно ограниченное число операций, отличающихся характеристиками трудоемкости, сырьемкости, коэффициентами модернизации характеристик производственных операций):

- производственные операции субъекта «предприятия» по производству СП, ПП и услуг;
- производственные операции субъекта «внешний мир» по производству СП, ПП и услуг;

- модернизационные операции субъекта «предприятия» по модернизации средств производства СП, ПП и услуг;
- модернизационные операции субъекта «внешний мир» по модернизации средств производства СП, ПП и услуг.

Вполне аналогично сократятся множества иных рассматриваемых операций.

Функционалы субъектов полученной макромоделю определяются как суммы функционалов микроагентов, агрегированных в данный субъект. Функционал оперирующей стороны при этом не меняется.

Достаточно естественное полное сценарное условие данной макромоделю может быть получено путем построения ряда вспомогательных моделей поведения экономических агентов (субъектов) макромоделю:

- моделей управления проведением НИОКР, производством и модернизацией субъектами «предприятия» и «внешний мир»;
- моделей распределения доходов субъектами П, ВМ и «домашние хозяйства»;
- моделей рынка товаров и услуг и рынка труда;
- модели налогообложения субъектом «государство» субъектов П и ДХ;
- демографической модели;
- моделей обучения, просвещения, здравоохранения, социального обеспечения, природоохранения.

Производство, модернизация и НИОКР тесно связаны. Эффективность вложений в модернизацию зависит от размера имеющихся, создаваемых в процессе проведения НИОКР, нематериальных активов. Параметры эффективности производственных операций улучшаются в процессе модернизации. Для описания процесса проведения этих связанных операций неким субъектом «i» можно задать характерную для него и для той или иной проводимой им производственной операции «j» функцию, определяющую вектор затрат на модернизацию данной производственной операции с улучшением имеющихся трудоемкости, фондоемкости, материалоемкости, экологичности (затрат ПР на единицу продукции) на заданные проценты при имеющихся нематериальных активах. Составляющими этого вектора затрат при этом являются использование и амортизация средств производства, затраты сырья и материалов, затраты природных ресурсов в связи с экологическим ущербом и прямые затраты (в случае необходимости проведения добычи полезных ископаемых), использование квалификационного потенциала и финансовые затраты в процессе проведения рассматриваемой модернизационной операции.

Выбор субъектом финансовых затрат на модернизацию некоторой производственной операции и приоритетов (весов) возможных целей модернизации (уменьшение трудоемкости, фондоемкости, материалоемкости, энергоемкости, экологичности модернизируемой производственной операции) полностью определяет результаты модернизации и затраты на ее проведение. Этот выбор и является управлением субъекта в проведении данной модернизации. Управлением субъекта в проведении НИОКР являются финансовые затраты на

НИОКР. Зная эти затраты и характерные для рассматриваемого субъекта значения эффективности и трудоемкости проведения НИОКР можно определить затраты счета КВП и увеличение сальдо счета НМА в результате проведения НИОКР. Управлением субъекта в производственной операции является объем производства продукции или услуг из которого, при имеющихся значениях трудоемкости, фондоемкости, материалоемкости, энергоемкости, экологичности, определяются затраты данной производственной операции.

Модели распределения доходов субъектом в первом приближении могут задаваться процентами от имеющихся у него в текущий момент денежных средств, которые направляются им на потребление, инвестирование и кредитование других субъектов, обучение, просвещение, социальное обеспечение и здравоохранение, имеющихся у него людских ресурсов, природоохранные мероприятия, НИОКР, модернизацию.

Модель рынка товаров и услуг, производимых в рассматриваемой макромоделе субъектами П, ВМ и ДХ, в простейшем случае может быть задана в виде долей приобретения средств производства и услуг по их обслуживанию каждым из них у двух других и у самого себя и долей приобретения предметов потребления и потребительских услуг всеми субъектами у субъектов П, ВМ и ДХ. Модель рынка труда — стоимостями 1 часа рабочего времени работника с единичным уровнем квалификации, принадлежащего к людским ресурсам субъектов ДХ и ВМ.

Модель налогообложения субъектом «государство» субъектов П и ДХ задается базами и ставками действующих налогов и пошлин (НДС, налог на прибыль и имущество, таможенные пошлины и др.).

Простейшая демографическая модель может быть задана в виде определяемых экспертно-статистическим путем функций рождаемости и смертности субъектов ДХ и ВМ от уровней потребления, здоровья, квалификации и просвещенности людских ресурсов данных субъектов.

Модели обучения, просвещения, здравоохранения, социального обеспечения, природоохранной деятельности, проводимых каждым из субъектов, могут быть заданы в виде необходимых характеристик обучающихся, просветительских, здравоохранительных, социальных и природоохранных операций каждого субъекта.

По аналогии с процедурой построения рассмотренной выше макроэкономической операционной модели экономического развития государства в целом могут строиться модели, ориентированные на решение задач управления предприятиями и корпорациями, региональными промышленными комплексами, социально-экономическим развитием регионов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная техника игрового операционного моделирования с применением сценарного планирования для сведения игровых задач к оптимизационным была использована в решении задач прогнозирования динамики основных производственно-экономических показателей развития промышленного комплекса г. Москвы в 2007—2009 гг. при различных сценариях управления этим комплексом со стороны Правительства Москвы и реализации не контролируемых им факторов. Анализировались сценарии, различающиеся по уровню бюджетных вложений и предпочтений для промышленного комплекса города со стороны правительств Москвы и России, по уровню инвестиционной активности иных инвесторов, по уровню загрузки имеющихся производственных мощностей предприятиями промышленного комплекса города.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гермейер Ю. Б. Игры с непротивоположными интересами. — М.: Наука, 1976.
2. Кукушкин Н. С., Морозов В. В. Теория неантагонистических игр. — М.: Изд-во МГУ, 1984. — 104 с.
3. Горелик В. А., Горелов М. А., Кононенко А. Ф. Анализ конфликтных ситуаций в системах управления. — М.: Радио и связь, 1991. — 288 с.
4. Кононенко А. Ф., Шевченко В. В. Задачи управления производственными корпорациями и операционные игры. — М.: ВЦ РАН, 2004. — 42 с.

e-mail: kon@ccas.ru

Статья представлена к публикации членом редколлегии А. С. Манделем. □



Уважаемые читатели!

Если вы не успели или забыли подписаться на журнал "Проблемы управления", то через редакцию Вы можете оформить льготную подписку в любое время и с любого номера (дешевле, чем через каталоги агентств) или приобрести номера журнала за прошедшие годы.

Можно также заказать электронные версии как необходимого вам номера журнала, так и отдельных статей.

Обратитесь в редакцию по тел. (495) 330-42-66 или пришлите заказ по адресу (datchik@ipu.ru) — и подписка будет оформлена за один день. Расходы по пересылке журнала редакция берет на себя. Не забудьте указать свой полный почтовый адрес!

Наш адрес: 117997, Москва, В-342, ГСП-7, Профсоюзная ул., 65, ИПУ РАН, оф. 272.



МОДЕЛЬ ФИНАНСОВОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И СЦЕНАРИИ ВНУТРЕННИХ ИНВЕСТИЦИЙ

О. И. Дранко

Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный

Рассмотрена математическая модель прогнозирования финансовой отчетности, позволяющая в короткие сроки провести анализ перспективного финансового состояния предприятия, оценить нехватку денежных средств (потребность в финансировании). Уделено внимание сценариям управления повышением внутренней эффективности бизнеса. В качестве параметров управления используются показатели, рассчитываемые из общедоступной финансовой отчетности. Приведены результаты работ по повышению внутренней эффективности предприятий различных отраслей.

ВВЕДЕНИЕ

Для роста экономики страны нужны инвестиции. Этот тезис повторяется часто на различных уровнях управления и стал уже почти аксиомой. Но сколько, на что (на какие проекты), какой результат будет получен — ответов часто нет.

Для отдельного предприятия разработана и стала широко применяться оценка окупаемости инвестиций с помощью техники бизнес-планирования, которая «хорошо работает» для отдельных проектов по новым видам продукции, но не очень удобна для предприятия в целом.

Многие предприятия ставят и решают задачу роста объемов продаж на 30 — 50 % в год¹. Технология формирования системы сбалансированных показателей позволяет конкретизировать эти цели на различных уровнях управления. В настоящей статье приводится подход, который позволяет сбалансировать показатели финансовых планов.

Финансовые условия роста описываются моделью финансового прогнозирования, рассматриваемой ниже. Важным элементом построения модели является учет «законов сохранения» — использование финансовых балансовых соотношений. В процессе исследования выявляются резервы — источники внутреннего финансирования. Анализируемые изменения рассматриваются на достаточно большом промежутке времени, поэтому важна общая сумма вложенных средств (чистой прибыли).

¹ Согласно рейтингу 400 крупнейших компаний России, средний прирост объема продаж в 2005 г. по отношению к 2004 г. составил 33,1 %. Журнал «Эксперт». — 2006. — № 38 (536).

Возможности роста оказываются ограниченными финансовыми ресурсами в виде потребности в оборотных и внеоборотных активах. Недостаток возможности финансирования приводит к ограничению роста. «Внутренние инвестиции» — высвобождение скрытых финансовых возможностей — позволяют значительно ускорить рост.

1. КРИТЕРИИ ФИНАНСОВОГО РАЗВИТИЯ

Для различных стратегий развития предприятия можно сформулировать несколько целевых показателей. Каждый из них может быть сформулирован на различных этапах эволюции организации и заключается в максимизации:

- роста продаж, доли рынка;
- прибыли;
- денежного потока;
- стоимости бизнеса.

Содержательный анализ перечисленных целей показывает, что:

— для увеличения денежных потоков и стоимости бизнеса высвобождение внутренних финансовых резервов напрямую влияет на их достижение, так как дают прямую добавку (при доходном способе определения стоимости бизнеса через приведенный денежный поток);

— для увеличения прибыли высвобождение внутренних финансовых резервов позволяет сократить сумму кредитов, что дает увеличение прибыли на сумму процентов по ним; однако при ставках 10—15 % годовых эта сумма значительно меньше размера высвобожденных финансовых резервов;

— для роста объема продаж ограничением может являться финансирование (могут потребоваться значительные инвестиции); в таком случае высвобождение

внутренних финансовых резервов способствует достижению целей, но не напрямую.

В качестве основной рассмотрим задачу максимального темпа роста компании (например, по объему продаж S): $\Delta S/S \rightarrow \max$.

Потребность в финансировании существенно ограничивает рост компании, как будет видно из описанной далее модели. Поэтому сформулируем промежуточный критерий AFN минимизации потребности в дополнительном финансировании (подходящий для многих стратегий): $AFN \rightarrow \min$ при обеспечении требуемых темпов роста $\Delta S/S \geq S^p$, где S^p — минимально приемлемые темпы роста объема продаж.

2. МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

Модель прогнозирования финансовой отчетности описана в содержательных терминах [1–3], но пока широко не используется специалистами финансово-экономических подразделений предприятий. В работах [4, 5] показан пример ее практического применения. В данной статье исследуются возможности применения модели для достижения различных целей развития организации.

Для определения возможностей роста рассмотрим модель, увязывающую баланс и отчет о доходах/расходах предприятия.

Опишем баланс предприятия через совокупность B балансовых статей: внеоборотных FA и оборотных CA активов, текущих пассивов CL , кредитов D и собственного капитала Eq :

$$B_i = \{FA_j, CA_l, CL_k, D_m, Eq_n\},$$

где j, l, k, m и n — индексы статей.

Аналогично по плану прибылей/убытков P :

$$P_i = \{S_p, E_r\},$$

где S — продажи, E — расходы, p и r — индексы статей.

Заметим, что есть ключевая связь, увязывающая два основных финансовых документа: баланс и план по прибылям/убыткам. Она состоит в увеличении собственного капитала на размер чистой прибыли NI :

$$\Delta Eq = NI = S - E = S(1 - k_E).$$

Важно: это соотношение играет роль «закона сохранения», «инварианта» системы. Многие физические задачи решаются, опираясь на законы сохранения. Здесь, по сути, используется «финансовый» закон сохранения. Второе балансовое уравнение есть равенство активов и пассивов:

$$FA + CA = CL + D + Eq.$$

Прогноз финансовых состояний (отражается в прогнозных и плановых документах — балансе и плане прибылей/убытков) осуществляется с помощью модели прогнозирования:

$$(B, P)^F = M(B, P, U, E_U),$$

где F — индекс прогноза, U — управление статьями, E_U — затраты на управление статьями.

Конкретный вид модели прогнозирования отдельных статей может различаться у различных предприятий.

При независимом (впрямую несвязанном) прогнозировании различных статей может нарушаться правило, что активы равны пассивам, т. е. возникать «дефицит финансирования» или потребность в дополнительном финансировании (разница прогнозных активов и прогнозных пассивов):

$$AFN^0 = FA^F + CA^F - CL^F - D^F - Eq^F.$$

Перепишем это выражение (индекс «0» означает отсутствие управления — начальный прогнозный вариант) с учетом управления, используя понятие собственного оборотного капитала $WC = CA - CL$, в терминах прироста:

$$\begin{aligned} AFN &= AFN^0 - U + E_U = \\ &= \Delta FA + \Delta WC - \Delta D - \Delta Eq - U + E_U. \end{aligned}$$

Комментарий: в управлении денежными потоками есть жесткое ограничение на реализуемость планов: *Денежный поток* ≥ 0 .

В косвенной форме движения денежных средств денежный поток включает в себя чистую прибыль, амортизацию, привлечение пассивов минус инвестирование в активы. В рамках описываемой модели используется похожий подход, но акцент делается на меры по высвобождению внутренних ресурсов для достижения целей.

Один из наиболее простых вариантов модели прогнозирования — рост статей оборотных активов и текущих пассивов пропорционально объему продаж. В этом случае объем продаж — величина, задаваемая извне (экзогенно).

Исследования [1, 6] показали, что для многих предприятий «устойчивыми» являются коэффициенты оборачиваемости оборотных активов и текущих пассивов. Часто используются коэффициенты удельных затрат, но скорее из-за возможности получить эту информацию из финансовых отчетов.

После простых преобразований

$$AFN = \Delta FA + \Delta S k_{WC} - \Delta D - NI - U + E_U.$$

где $k_{WC} = WC/S$ — срок оборачиваемости собственного оборотного капитала, $k_{CA} = CA/S$ — срок оборачиваемости оборотных активов, $k_{CL} = CL/S$ — срок оборачиваемости текущих пассивов, $k_{WC} = k_{CA} - k_{CL}$.

3. УПРАВЛЕНИЕ ВНУТРЕННИМИ ИНВЕСТИЦИЯМИ

Опишем изменения внутри компании набором мероприятий по изменению сроков оборачиваемости, удельных затрат k_E , по каждому из которых свои затраты на реализацию этого мероприятия: $U = \{\Delta k_{WC}^j, \Delta k_E^j, E_U^j\}$.

Вклад каждого мероприятия в общий критерий:

$$AFN^j = S(\Delta k_{WC}^j + \Delta k_E^j) - E_U^j.$$



Так как мероприятия уменьшают потребность в финансировании, то «хорошие» мероприятия удовлетворяют критерию $AFN^j < 0$.

Затраты на управление можно записать в виде простой модели линейной (пропорциональной) зависимости. Более адекватная модель — совокупность набора мероприятий [7] с огибающей, выбранной, например, по методу «затраты—эффективность» («насыщение отдачи»). Выбор мероприятий для реализации может осуществляться по нескольким правилам.

- Эффект от мероприятия должен быть больше затрат на его реализацию. Каждое мероприятие уменьшает потребность в финансировании, т. е. обеспечивает $\Delta AFN < 0$ или $AFN^j < 0$.

Правило может применяться при неограниченных организационных возможностях по реализации мероприятий.

- Должен быть пороговый удельный эффект от реализации. Производится ранжирование (для последующего учета возможностей реализации):

$$AFN^j/E_U^j = S(\Delta k_{WC}^j + \Delta k_E^j)/E_U^j - 1,$$

устанавливается предельное отношение $AFN^j/E_U^j \leq AFN_E^{\max}$.

Правило может применяться при ограниченных организационных возможностях по реализации мероприятий, выбор ограничения AFN_E^{\max} определяется этими возможностями.

- Должен быть пороговый эффект от реализации. Устанавливается предельный вклад в финансирование $AFN^j \leq AFN^{\max}$.

С учетом затрат на реализацию этих мероприятий

$$U - E_U = \begin{cases} -\Delta k_{WC} - \text{уменьшение собственного} \\ \text{оборотного капитала,} \\ -\Delta k_E - \text{сокращение затрат.} \end{cases}$$

В результате

$$AFN = \Delta FA - \Delta D - S(1 - k_E) + \Delta S k_{WC} + \Delta k_{WC} + \Delta k_E. \quad (1)$$

Наблюдается монотонная зависимость величины AFN от параметров управления², учтенных в формуле (1). При $k_{WC} > 0$ (при работе на собственных оборотных средствах) и росте продаж S потребность в финансировании AFN растет.

Поэтому для $AFN \rightarrow \min$ необходимо: $\Delta k_{WC} \rightarrow \min$, $\Delta k_E \rightarrow \min$.

² В модели не рассматривается коэффициент реинвестирования прибыли (распределения прибыли на потребление и накопление), важна общая сумма реинвестированных средств за период. Но возможен анализ оптимизации суммы потребления за период, и на достаточно больших промежутках времени имеет «переключение» от максимизации накопления к максимизации потребления.

Содержательно это решение можно описать следующими правилами:

- максимальное сокращение срока оборачиваемости оборотных активов;
- максимальное увеличение срока оборачиваемости текущих пассивов;
- максимальное сокращение удельных затрат.

Фактически это означает, что следует принять мероприятия (с учетом затрат на их реализацию) $\Delta k_{WC} \leq 0$ и $\Delta k_E \leq 0$.

В данном решении начинает сказываться модельное ограничение по времени (например, год). Соответственно, рассматриваются мероприятия с полученным эффектом в течение рассматриваемого периода. Часть мероприятий могут дать эффект за пределами периода, но для оценки их влияния следует принять модель оценки инвестиционных проектов.

Модель сбалансированного роста [2] рассматривает развитие предприятия без дополнительных инвестиций, т. е. $AFN = 0$, $\Delta FA = 0$, $\Delta D = 0$.

Предельный рост в этом случае

$$\Delta S/S = (1 - k_E - \Delta k_E - \Delta k_{WC})/k_{WC}.$$

Дополнительный темп роста продаж благодаря «внутренним» инвестициям

$$\Delta S/S = (-\Delta k_E - \Delta k_{WC})/k_{WC}.$$

Знаки «минус» указывают на сокращение затрат и срока оборачиваемости.

4. РЕАЛИЗУЕМОСТЬ

Возникает ряд вопросов по реализации рассмотренного подхода на практике. Насколько предприятие может высвободить внутренние резервы? И почему этот вопрос стоит на российских предприятиях?

По экспертным оценкам, полученным по опросам на различных предприятиях, диапазон улучшений параметров управления составляет в год (типичные оценки):

- по срокам оборачиваемости 10—20 % (в общем, значительно);
 - по удельным затратам 2—4 %;
 - по высвобождению внеоборотных активов 1—3 %.
- Однако есть комплекс ограничений по реализации:
- технологические пределы: по удельным затратам норм расхода материалов, труда, энергоресурсов;
 - управленческие, касающиеся функционирования: минимальное потребление обслуживающих бизнес-процессов по текущему (краткосрочному) функционированию — операционной работе;
 - управленческие, касающиеся развития: минимальное потребление обслуживающих бизнес-процессов по долгосрочному функционированию и развитию, призванному обновлять продукты, процессы, технологии, исполнителей, т. е. все потребляемые ресурсы предприятия;
 - организационно-инерционные: менеджмент предприятий погружен в «текучку» и не проводит политику активных изменений в организации, не «созрела» критическая масса потребности в изменениях, часто при-

Результаты работ для некоторых предприятий

Предприятие	Факторы	Результат
Предприятие ликеро-водочной промышленности	Кредиторская задолженность перед бюджетом: акцизы со сроком оплаты 38 дней в среднем	Объем продаж увеличился в 3 раза
Предприятие пищевой промышленности	Перевод дебиторской задолженности в кредиторскую: предоплата 1 мес. денежными средствами вместо отсрочки 1 мес. — условие предоставления скидки 20 %. Сокращение затрат на 20 % из-за платежей поставщикам денежными средствами	Объем продаж увеличился в 2 раза, стоимость компании выросла в 20 раз
Предприятие машиностроения	Сокращение срока оборачиваемости с 4 до 3 мес.	Высвобождение 5 млн руб. свободных средств на реализацию крупного инвестиционного проекта
Предприятие нефтяной геологии	— Сокращение дебиторской задолженности на 30 %. — Сокращение затрат на 25 %. — Предполагается реализовать около 15 % внеоборотных активов	Финансовая стабилизация в 2001 г. в условиях кризиса на рынке нефти и его переноса на другие работы

существует формальный подход без реальной заинтересованности людей (обзор возможных последствий приведен в работе [8];

— квалификационные: многие специалисты предприятий не знакомы с этим подходом, так как в учебниках по экономике на эти факторы не обращается внимание.

В результате анализа выполненных работ на ряде промышленных предприятий выявлены факторы внутренних инвестиций, приведенные в таблице.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная модель финансового прогнозирования позволяет:

— оценить реализуемость планов максимального роста компании и выявить потребность в дополнительном финансировании, прежде всего, оборотного капитала;

— установить финансовые параметры условий достижения целей, включая рост продаж, повышение прибыльности и уменьшение сроков оборачиваемости;

— выделить направления первоочередного внимания руководства предприятий по финансовому обеспечению достижения целей развития организации по максимальному покрытию дефицита финансовых ресурсов;

— оценить темпы спада производства в условиях гиперинфляции. Дело в том, что возникновение финансовых трудностей возникает при условии роста объема продаж в случае, когда оборотные активы больше текущих пассивов. Изменение объема продаж возможно как из-за роста продаж в натуральном выражении, так и за счет повышения цен. Одна из таких возможностей — большой рост цен (гиперинфляция). Нехватка возможностей финансирования оборотных средств вызывает уменьшение продаж (в натуральном выражении).

Применение модели на действующих предприятиях для поиска внутренних инвестиций позволило реализовать сценарии роста или финансовой стабилизации без привлечения внешних инвестиций. Главное условие

(приоритетное направление поиска финансовых ресурсов) состоит в возможности сокращения срока оборачиваемости оборотных активов и (или) увеличения срока оборачиваемости текущих пассивов (отсрочек по платежам). Взрыв популярности техники бизнес-планирования объясняется тем, что это один из важных инструментов управления оборачиваемостью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дранко О. И., Кислицына Ю. Ю. Многоуровневая модель финансового прогнозирования деятельности предприятия // Управление социально-экономическими системами: Сб. тр. молодых ученых ИПУ РАН. — М.: Фонд «Проблемы управления», — 2000. — С. 209—221.
2. Уолш К. Ключевые показатели менеджмента: Как анализировать, сравнивать и контролировать данные, определяющие стоимость компании. — М.: Дело, 2001.
3. Брейли Р., Майерс С. Принципы корпоративных финансов. — М.: ЗАО «Олимп-Бизнес», 1997.
4. Дранко О. И. Финансовый менеджмент: Технологии управления финансами предприятия. — М.: ЮНИТИ — ДАНА, 2004.
5. Бирюков С. Е., Хайниш С. В. От стратегии выживания к стратегии активного развития (практика реформирования и финансового оздоровления ОАО «Владимирский завод "Электроприбор"»). Из опыта управленческого консультирования. — М.: МНИИПУ, 2001.
6. Оптимизация коммерческого цикла / Баркалов С. А., Колпачев В. Н., Потапенко А. М., Уандыков Б. К. // Системы управления и информационные технологии. — 2003. — № 1, 2 (12).
7. Балашов В. Г. Модели и методы принятия выгодных финансовых решений. — М: Изд-во физ.-мат. лит., 2003.
8. Сулл Д. Н. Почему хорошие компании терпят неудачу и как выдающиеся менеджеры их возрождают. — М.: Альпина Бизнес Букс, 2004.

☎ (495) 576-40-22;

e-mail: dranko@pop3.mipt.ru

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



ЗАДАЧА УПРАВЛЕНИЯ СТОИМОСТЬЮ КОМПАНИИ: ДИСКРЕТНЫЙ СЛУЧАЙ

В. С. Романов

Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный

Предложена математическая модель управления стоимостью компании — от оценки до расчета влияния отдельных проектов на стоимость компании — и на ее основе поставлена задача максимизации стоимости, которая исследована в дискретном случае. Показано, что распространенный метод «затраты—эффект» не дает верных решений из-за неделимости проектов и наличия синергетического эффекта между ними. Для решения задачи предложены три эвристики, аналогичные используемым для анализа привлекательности инвестиционных проектов, — индексу прибыльности, чистому приведенному доходу и внутренней норме доходности, возможность их применения проанализирована с помощью численного эксперимента.

ВВЕДЕНИЕ

По мнению многих исследователей, консультантов и инвесторов максимизация стоимости должна быть ключевой задачей менеджеров компаний. Однако модель управления стоимостью в литературе формализуется редко, еще реже делаются попытки предложить способы решения возникающих оптимизационных задач.

Существующие подходы к управлению стоимостью компании предлагают следующую схему [1–3]:

- 1) построение модели оценки стоимости;
- 2) определение факторов стоимости;
- 3) расчет чувствительности стоимости к факторам;
- 4) определение набора направлений управленческих воздействий, наиболее перспективных для увеличения стоимости компании.

В смысле решения задачи управления компанией в такой схеме отсутствуют следующие завершающие шаги:

5) количественная оценка изменения стоимости (максимизируемой функции) в результате применения каждого из предлагаемых воздействий с учетом затрат на их осуществление;

6) окончательный выбор воздействий, обеспечивающих максимальный рост стоимости с учетом внутренних и внешних ограничений.

Для выполнения шага 5 необходимо иметь модель управления стоимостью компании, которая позволяла бы давать ответ на вопрос: как изменится стоимость при применении тех или иных управленческих воздействий? Шаг 6 может быть выполнен путем решения оптимизационной задачи: максимизации стоимости при заданных ограничениях.

В настоящей работе на основе модели экспресс-оценки стоимости компании [4] предлагается подход, позволяющий последовательно поставить и решить задачу управления стоимостью акционерного капитала компании с учетом шагов 5 и 6. Выбор модели оценки стоимости не является принципиальным, и предлагае-

мая методика управления стоимостью компании может быть реализована и на основе какой-либо другой модели оценки стоимости.

1. МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ СТОИМОСТЬЮ

Общий вид модели оценки стоимости акционерного капитала компании выглядит следующим образом: $E = E_0(\vec{F}_0)$ где E — стоимость акционерного капитала компании, E_0 — функция оценки стоимости, \vec{F}_0 — вектор факторов стоимости. Задача оценки — определить функцию E_0 и вектор \vec{F}_0 .

Модель управления стоимостью предлагается строить в следующем виде: $E = E_0(\vec{F}_0 + \vec{U})$, где \vec{U} — вектор управленческих воздействий.

1.1. Модель оценки

В качестве модели оценки стоимости акционерного капитала компании воспользуемся моделью экспресс-оценки стоимости [4, 5]. Модель применима к производственным и коммерческим компаниям и не может использоваться напрямую для оценки финансовых институтов (банков, страховых и инвестиционных компаний). Для указанных типов компаний модель универсальна.

Модель оценки базируется на концепции дисконтированного денежного потока фирмы [6–8]. Приведем ее основные соотношения:

$$E = V_1 + V_2 - D, \quad (1)$$

$$V_1 = \sum_{i=1}^N \frac{FCF_i}{(1+r)^i} = \sum_{i=1}^N \frac{R_i \cdot EBITM_i(1-\tau) - I_i}{(1+r)^i} + \sum_{i=1}^N \frac{R_i(APT_i - CAT_i)/T_i - R_{i-1}(APT_{i-1} - CAT_{i-1})/T_{i-1}}{(1+r)^i}, \quad (2)$$

$$V_2 = \frac{NOPLAT_{N+1}(1-g/ROIC)}{(r-g)(1+r)^i}, \quad (3)$$

где E (Equity) — оценка текущей рыночной стоимости акционерного капитала компании; D (Debt) — краткосрочный и долгосрочный долг; i — номер года; N — длительность прогнозного периода, лет; FCF (Free Cash Flow) — свободный денежный поток фирмы в i -й год; R (Revenue) — доход; $EBITM$ (EBIT Margin) — операционная рентабельность, %; τ — ставка налога на прибыль; I — чистые капитальные затраты; r — ставка дисконтирования; T_i — длительность i -го года, дни; APT (Accounts Payable Turnover) — оборачиваемость кредиторской задолженности, дни; CAT (Current Assets Turnover) — оборачиваемость оборотных активов, дни; $NOPLAT$ (Net Operating Profit Less Adjusted Taxes) — чистая прибыль от основной деятельности за вычетом скорректированных налогов; g — скорость роста прибыли ($NOPLAT$) компании в каждый год постпрогнозного периода; $ROIC$ (Return On Invested Capital) — рентабельность инвестированного капитала, которая определяется следующей формулой:

$$ROIC = \frac{NOPLAT}{FA + CA - AP},$$

где FA (Fixed Assets) — внеоборотные активы, CA (Current Assets) — оборотные активы, AP (Accounts Payable) — кредиторская задолженность и прочие краткосрочные обязательства.

Обозначим вектор (R_1, \dots, R_N) через \vec{R} , аналогичным образом введем векторы \vec{EBITM} , \vec{CAT} , \vec{APT} , \vec{I} . Согласно формулам (2) и (3), вектор факторов стоимости выглядит следующим образом:

$$\vec{F}_0 = (\vec{R}, \vec{EBITM}, \vec{CAT}, \vec{APT}, \vec{I}, NOPLAT_{N+1}, r, RPIC, g).$$

Величины APT_0 , CAT_0 , и T_i считаются фиксированными и поэтому не входят в число факторов. Функция $E_0(\vec{F}_0)$ описывается уравнениями (1)–(3).

1.2. Модель управления

Для удобства будем оперировать не с векторами из $5N + 4$ элементов, а матрицами. Введем матрицу X :

$$X = \begin{pmatrix} \vec{R} \\ \vec{EBITM} \\ \vec{CAT} \\ \vec{APT} \\ \vec{I} \\ (NOPLAT_{N+1}, 0, \dots, 0) \\ (r, 0, \dots, 0) \\ (ROIC, 0, \dots, 0) \\ (g, 0, \dots, 0) \end{pmatrix}.$$

Размер данной матрицы — $9 \times N$. Обозначим пространство матриц X через S , а через X_0 — фиксированную матрицу, определяющую проведенную оценку стоимости компании. Введем матрицу управляющих воздействий $U = \{u_{ij}\} \in S$. Тогда модель управления стоимостью акционерного капитала компании выглядит следующим образом: $E = E_0(X_0 + U)$ [9].

2. ПРОЕКТЫ УВЕЛИЧЕНИЯ СТОИМОСТИ КОМПАНИИ

Управлять стоимостью — означает изменять денежные потоки компании и оценку рисков, определяемую ставкой дисконтирования r . Такие изменения производятся посредством реализации проектов. Приведем их примеры.

- Уменьшить оборачиваемость дебиторской задолженности (в днях) за счет введения скидок при оплате авансом. В модели это выразится в снижении значений CAT и R .
- Внедрить модуль ERP «планирование производства» и понизить оборачиваемость сырья, материалов, готовой продукции. В модели это выразится в снижении значения CAT , а также повлечет затраты на внедрение и поддержку ERP-системы.
- Снизить ставку дисконтирования r путем увеличения рейтинга корпоративного управления компании в первом году прогнозного периода. Это повлечет затраты в первом и последующих годах на выполнение рекомендаций по корпоративному управлению.

Таким образом, каждый проект описывается изменением факторов стоимости компании и дополнительным денежным потоком затрат на осуществление проекта, характеризующим стоимость управления.

3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МАКСИМИЗАЦИИ СТОИМОСТИ

Поставим задачу максимизации стоимости как задачу выбора подмножества проектов, дающих наибольшее увеличение стоимости в рамках заданных ограничений. В качестве ограничений могут фигурировать: бюджет, производственные мощности, число свободных сотрудников для осуществления проектов, наличие помещений для ведения проектов и т. д. Учтем только одно ограничение — бюджетное.

Рассмотрим компанию с проведенной оценкой стоимости, определяемой матрицей X_0 . Назовем проектом любую матрицу $U \in S$. Сделаем следующие предположения.

Предположение 1. Управления U_{ij} независимы, иначе говоря, возможно независимое изменение переменных X_{ij} .

Предположение 2. Проекты $U \in S$ аддитивны, т. е. возможно выполнение двух проектов U^1 и U^2 одновременно, и результатом их выполнения будет $(U^1 + U^2)$.

Введем понятие стоимости управления. Стоимостью управления U будем называть последовательность $CU = (CU_1, CU_2, \dots)$, описывающую денежный поток затрат на управление, в общем случае бесконечную. Также данная последовательность должна зависеть от точки X_0 , характеризующей предположения о будущем развитии компании. Иначе говоря, имеется отображение $CU_i = CU_i(X_0, U)$.

Текущая стоимость (Present Value) денежного потока затрат на управление описывается формулой $PV_{CU} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{CU_i(X_0, U)}{(1+r+u_{71}^k)^i}$. Обозначим множество возможных



проектов через P , множество проектов, составляющих решение — через P^* . Тогда задача записывается в виде:

$$\begin{cases} E_0\left(X_0 + \sum_{k \in P} U^k\right) - \sum_{k \in P} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{CU_j^k}{(1+r+u_{71}^k)^j} \rightarrow \max_{P^* \in P} \\ U^k \in U_0, \forall k \in P, \\ \sum_{k \in P} CU_j^k \leq B_j, j = 1, \dots, J, \end{cases} \quad (4)$$

где U_0 — множество допустимых управлений, B_j — бюджетное ограничение, J — число лет, в течение которых бюджетные ограничения существенны. Множество U_0 должно содержать следующие содержательные ограничения: $R_i \geq 0$, $EBITM_i \leq 0$, $CAT_i \geq 0$, $APT_i \geq 0$, $r > r_f$ — безрисковая ставка. При постановке задачи для конкретной компании новые ограничения будут наложены как самой компанией, так и отраслью, в которой она работает.

Принципиальная особенность данной задачи состоит в нелинейности функции $E_0(X)$ по X . Смысл этой нелинейности заключается в том, что при применении нескольких проектов может появиться синергетический эффект — прирост стоимости будет больше, чем сумма приростов стоимости при применении каждого из этих проектов отдельно.

4. ЗАДАЧА МАКСИМИЗАЦИИ В ДИСКРЕТНОМ СЛУЧАЕ

4.1. Исследование задачи

Задача (4) может рассматриваться в двух случаях.

- Число проектов конечно — задача дискретной оптимизации. Пример: 10 проектов, 2 варианта каждого: более и менее затратный; общее число вариантов: $3^{10} = 59\,049$.
- Число проектов бесконечно — задача математического программирования. Пример: K проектов, результат U^k каждого проекта зависит от вложений в него в первом периоде (CU_1^k). Функция, описывающая подобную зависимость, называется функцией отдачи от проекта. Пример решения непрерывной задачи для частного случая рассмотрен в работе [10].

В данной статье рассматривается дискретная задача. В дискретном случае задача (4) — это нелинейная разновидность задачи о ранце. Как известно, в общем случае для таких задач не существует точных решений, отличных от полного перебора.

Можно попытаться предложить метод, который бы позволил, используя особенности данной конкретной задачи, приходиться к приближенному решению.

Проанализируем возможность применения известного метода «затраты—эффект» [11] для решения данной задачи. Условия его применения следующие:

- 1) все проекты имеют одинаковую продолжительность;
- 2) все проекты начинаются в одно время;
- 3) все проекты независимы, исключение любой части проекта не влияет на реализуемость других;

4) возможна частичная реализация проекта; требуются частичные ресурсы, и достигается пропорциональный эффект;

5) есть один количественный показатель, который определяет эффект проекта (он обладает свойством аддитивности);

6) есть один количественный показатель, который является лимитирующим фактором для выполнения проекта.

Условия 1 и 2 выполнимы для рассматриваемой модели — все проекты можно рассматривать как начинающиеся в периоде 1 и заканчивающиеся в периоде $N+1$, условие 3 выполнимо по Предположению 2, бюджетное ограничение удовлетворяет условию 6. Условия, которые не выполняются, — 4 и 5. Проекты неделимы — нельзя внедрить половину ERP системы или выполнять четверть рекламной компании. Аддитивного показателя найти не удастся, так как функция $E_0(X)$ нелинейна по X . Кандидатами на него являются показатели, аналогичные используемым при оценке эффективности инвестиционных проектов [12]:

$$\Delta E^k = E_0(X_0 + U^k) - \sum_{j=1}^{\infty} \frac{CU_j^k}{(1+r+u_{71}^k)^j} - \text{аналог чистого приведенного дохода } NPV; \quad (5)$$

$$PI^k = \frac{\Delta E^k}{\sum_{j=1}^{\infty} \frac{CU_j^k}{(1+r+u_{71}^k)^j}} - \text{индекс прибыльности}; \quad (6)$$

Δr — аналог внутренней нормы доходности IRR , который определяется как наименьший неотрицательный действительный корень уравнения: $E_0(X_0 + U^k + [\Delta r]) -$

$$- \sum_{j=1}^{\infty} \frac{CU_j^k}{(1+r+u_{71}^k + \Delta r)^j} = 0, \text{ где через } [\Delta r] \text{ условно обозначена матрица из пространства } S \text{ с одним ненулевым элементом } u_{71} = \Delta r.$$

начена матрица из пространства S с одним ненулевым элементом $u_{71} = \Delta r$.

Но, к сожалению, эти показатели зависят от U^k нелинейно. Таким образом, метод «затраты—эффект» напрямую не применим для решения задачи (4) в дискретном случае.

Тем не менее, показатели (5), (6) и Δr можно использовать как эвристики — во многих случаях их применение приводит к правильному решению. Проанализируем результаты их работы с помощью численного эксперимента.

4.2. Анализ эвристик

Можно предложить следующий эвристический алгоритм решения задачи (4):

- 1) для каждого проекта рассчитать значение эвристических критериев (5), (6) или Δr ;
- 2) проекты упорядочить по убыванию эвристики;
- 3) из упорядоченного списка выбрать следующий проект;
- 4) добавить его во множество P^* (множество решений), если после добавления множество проектов P^* все еще удовлетворяет бюджетному ограничению;

5) пропустить проект, добавление которого нарушит бюджетное ограничение;

6) вернуться на шаг 3.

Для выполнения статистического эксперимента была разработана программа в Microsoft Excel, которая для конкретной компании:

1) создает случайным образом множество проектов $\{CU^k, U^k\}_{k=1, \dots, 8}$;

2) решает задачу максимизации точно, с помощью полного перебора;

3) решает задачу максимизации с использованием двух эвристик;

4) сравнивает полученные решения;

5) повторяет шаги 1–4.

Эксперимент выполнялся для восьми проектов и ста попыток. Было использовано два «крайних» типа проектов: *A* и *Z*. Проект типа *A* изменяет только один показатель, а проект типа *Z* — изменяет все показатели. Одновременно в эксперименте создавались проекты только одного типа. Эксперимент выполнялся при нескольких разных максимальных значениях величин CU_i^k . В процессе исследования вычислялась нереализованная стоимость, определяемая как разница стоимостей *E* при точном решении и при приближенном, полученном с помощью эвристического алгоритма.

Неправильные решения подсчитывались двумя способами:

1) процент ошибочных решений = число ошибочных решений/число попыток;

2) процент ошибочно не включенных проектов =

$$= \sum_{t=1}^{100} \frac{NS_t}{PS_t}, \text{ где } PS_t \text{ — число проектов, входящих в точное}$$

решение *t*; *NS_t* — число проектов, ошибочно не включенных в решение на основе эвристики.

Второй способ подсчета ошибок представляется более объективным. Поэтому выводы будут сделаны на основе его значений. Далее в таблице и на рис. 1–4 представлены полные результаты эксперимента. На каждом

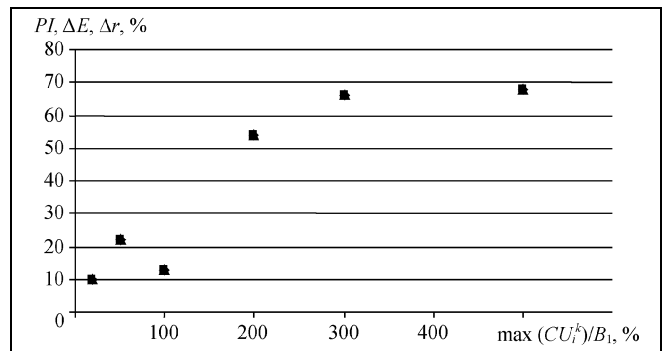


Рис. 1. Процент ошибочно не включенных проектов типа *A*

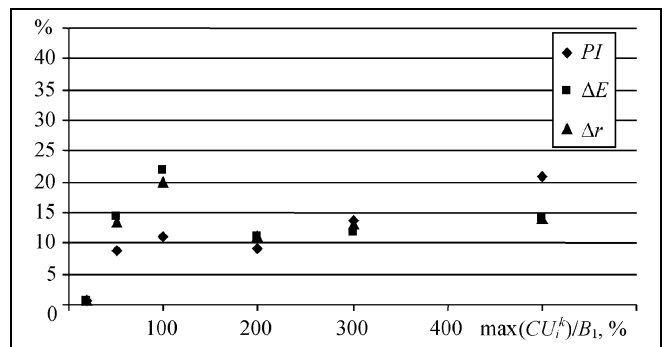


Рис. 2. Процент ошибочно не включенных проектов типа *Z*

графике есть три ряда данных, обозначенных как *PI*, *ΔE* и *Δr*. Эти ряды соответствуют применению эвристических критериев, соответственно, (5), (6) и *Δr*. По оси абсцисс отложены максимальные значения для величин CU_i^k в каждом эксперименте.

На основе анализа результатов численного эксперимента можно сделать следующие выводы:

- все три эвристики делают ошибки одинаково часто;

Результаты статистического эксперимента

Тип проекта	max (CU _i ^k)/B ₁ , %	Ошибочные решения, %			Ошибочно не включенные проекты, %			Нереализованная стоимость, %		
		<i>PI</i>	<i>ΔE</i>	<i>Δr</i>	<i>PI</i>	<i>ΔE</i>	<i>Δr</i>	<i>PI</i>	<i>ΔE</i>	<i>Δr</i>
<i>A</i>	20	34			10			0,5		
	50	50			22			2,5		
	100	22			13			0,8		
	200	56			54			0,8		
	300	68			66			0,6		
	500	69			68			0,1		
<i>Z</i>	20	7	8		1			0,1	0,2	
	50	37	39	37	9	14	13	2,0	3,4	3,0
	100	27	32	31	11	22	20	2,5	5,6	4,0
	200	14	15		9	11		1,2	3,3	2,5
	300	18	14	16	14	12	13	1,4	1,2	1,8
	500	21	14		21	14		0,8		0,5
Среднее		35			25	26	25	1,1	1,7	1,4

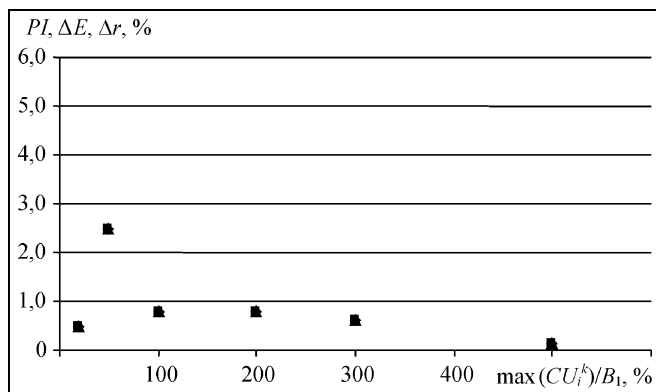


Рис. 3. Нереализованная стоимость, %; проекты типа А

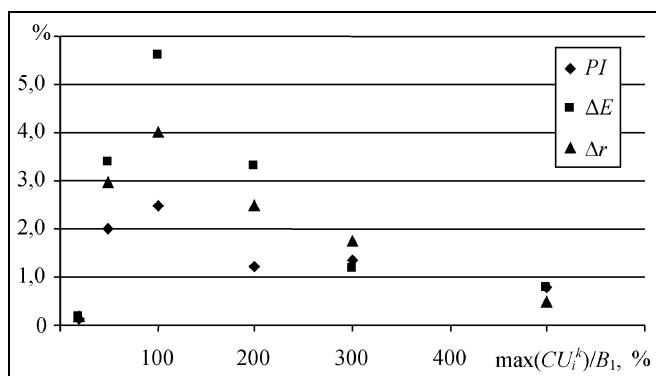


Рис. 4. Нереализованная стоимость, %; проекты типа Z

- в случае проектов, изменяющих только один показатель (тип А):
 - нереализованная стоимость одинакова для всех эвристик;
 - эвристики целесообразно применять, когда в решение по бюджету проходят 1—3 проекта ($\max(CU_i^k)/B_1, \%$, где $B_1 \leq 100 \%$); в таком случае число ошибочно не включенных проектов не превышает 25 %, нереализованная стоимость — 2,5 %;
- в случае проектов, изменяющих все показатели («сложные» проекты, тип Z):
 - нереализованная стоимость принимает наибольшие значения для эвристики ΔE (NPV), наименьшие — для PI (индекс прибыльности);
 - эвристики целесообразно применять в случаях, когда по бюджету проходят минимум 7—9 проектов ($\max(CU_i^k)/B_1, \%$, где $B_1 \geq 300 \%$); в данном случае число ошибочно не включенных проектов не превышает 25 %, а нереализованная стоимость — двух процентов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе предложена математическая модель управления стоимостью компании — от модели оценки до расчета влияния отдельных проектов на стоимость компании — и на ее основе поставлена задача максимизации стоимости, которая исследована в дискретном случае. Было показано, что распространенный метод ре-

шения «затраты—эффект» не дает верных решений из-за неделимости проектов и наличия синергетических эффектов на стоимость компании при реализации нескольких проектов.

Для решения задачи предложены три эвристики, аналогичные используемым для анализа привлекательности инвестиционных проектов — индексу прибыльности, чистому приведенному доходу и внутренней норме доходности, целесообразность их применения была проанализирована с помощью статистического эксперимента.

Дальнейшая работа возможна в следующих направлениях.

- Исследование непрерывной задачи максимизации стоимости. Анализ решений в частных случаях.
- Разработка методики выявления проектов повышения стоимости для выбранного предприятия/компании. Решение задачи максимизации стоимости для конкретных компаний требует наличия в качестве исходных данных множества проектов P , поэтому подобная методика позволит эффективно применять полученные результаты на практике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Самохвалов В. Как определить ключевые финансовые факторы стоимости? // Управление компанией. — 2004. — № 5. <www.zhuk.net/archive/articlesyk.asp?aid=4090>.
2. Егоров И. А. Стоимость бизнеса: Искусство управления. — М.: Дело, 2003.
3. Мордашев С. Рычаги управления стоимостью компании // Рынок ценных бумаг. — 2001. — № 15. <<http://www.rcb.ru/archive/articlesrcb.asp?aid=2028>>.
4. Романов В. С. Модель экспресс-оценки стоимости компании. — 2005. <http://www.cfin.ru/finanalysis/value/value_company.shtml>.
5. Дранко О. И., Кислицына Ю. Ю. Многоуровневая модель финансового прогнозирования деятельности предприятия // Управление социально-экономическими системами: Сб. тр. молодых ученых ИПУ РАН. — М.: Фонд «Проблемы управления», 2000. — С. 209—221.
6. Коупленд Т., Колер Т., Мури Д. Стоимость компаний: оценка и управление. — М.: Олимп-Бизнес, 2000.
7. Jennnergren L., Peter A. Tutorial on the McKinsey Model for Valuation of Companies // Fourth revision, August 26, 2002. — Stockholm School of Economics, 2002.
8. Fernandez P. Company valuation methods. The most common errors in valuations // Research Paper of University of Navarra. — 2002. — N 449.
9. Романов В. С. Оценка и управление стоимостью компании в рамках доходного подхода: Магистерская диссертация. — М.: МФТИ, 2003.
10. Романов В. С. Выбор стратегии роста компании на основании критерия максимизации ее стоимости // Системы управления и информационные технологии. — 2006. — № 2.1 (24). — С. 184—187.
11. Балашов В. Г., Ириков В. А. Технологии повышения финансового результата предприятий и корпораций — М.: ПРИОР, 2002.
12. Карибский А. В., Шишорин Ю. Р., Юрченко С. С. Финансово-экономический анализ и оценка эффективности инвестиционных проектов и программ (обзор). Часть I // Автоматика и телемеханика — 2003. — № 6.

☎ (495) 775-88-00, доб. 57-71;

e-mail: v_romanov@list.ru

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

ИДЕНТИФИКАЦИЯ СТАТИСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ЗАПОЛНЕНИЕМ ПРОПУСКОВ В ДАННЫХ

Л. А. Кузнецов, А. М. Корнеев, М. Г. Журавлева

Липецкий государственный технический университет

Исследована возможность применения стратегии *EM*-алгоритма к решению задачи построения линейных множественных моделей регрессии по массивам, содержащим неполную информацию о производственном процессе. Выполнено сравнение моделей, построенных по комплектам данным, и данным, пропуски в которых заполнялись безусловными и условными средними. Получена усовершенствованная модель зависимости одной из механических характеристик листового проката от набора факторов технологии, основанная на применении *EM*-алгоритма.

ВВЕДЕНИЕ

Построение статистических моделей зависимости выходных характеристик продукции от параметров технологии ее производства, предназначенных для решения задач прогнозирования и управления, предполагает использование массивов информации, которые часто содержат пропущенные значения. Если исключать наблюдения, содержащие хотя бы один пропуск, из-за недостаточного объема комплектов данных оценки параметров идентифицируемых моделей могут оказываться смещенными или искаженными. Поэтому предпочтительна обработка всей доступной информации и заполнение на ее основании пропущенных значений в информационном массиве.

Существующие методы заполнения пропусков [1, 2] не всегда применимы к решению задачи идентификации моделей зависимости между случайными величинами, изменяющимися в количественных шкалах. Один из способов анализа числовой информации заключается в заполнении безусловными средними или другими характеристиками частных выборочных распределений. Его целесообразно применять, когда исследуемые переменные независимы друг от друга, поэтому в рассматриваемом случае он малоэффективен (в работе это показано на практическом примере). Более результативны подходы, предполагающие использование существующей информации о связях. К простым относится метод заполнения пропусков условными средними по присутствующим значениям (метод Бака). Более надежна с

точки зрения получения оптимальных оценок параметров итеративная стратегия *EM*-алгоритма (expectation-maximization algorithm), каждая итерация которого подразумевает выполнение двух шагов: шага *E* — вычисления математического ожидания и шага *M* — максимизации (метод Бака является частным случаем данного метода, реализующим его первые две итерации) [1]. Помимо оценивания параметров, с помощью *EM*-алгоритма для неполной многомерной нормальной выборки можно решать другие задачи статистического анализа, в том числе задачу построения множественной линейной регрессии. Рассмотрим подробнее методику *EM*-алгоритма в контексте идентификации моделей зависимости выходных свойств продукции, являющейся результатом сложного производственного процесса, от факторов технологии.

1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ *EM*-АЛГОРИТМА

Пусть имеется k -мерная нормальная переменная $\mathbf{x} = (\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_k)$, причем $\mathbf{x} = (\mathbf{t}_1, \mathbf{t}_2, \dots, \mathbf{t}_r) \cup (\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, \dots, \mathbf{s}_{k-r})$, где $\mathbf{t}_i = (t_{i1}, \dots, t_{in})^T$ — i -я технологическая величина, $i = 1, \dots, r$, $\mathbf{s}_j = (s_{j1}, \dots, s_{jn})^T$, — j -я выходная характеристика, $j = 1, \dots, k-r$, полученные в результате пассивного эксперимента, n — число наблюдений. Она характеризуется параметрами $\theta = (\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma})$, где $\boldsymbol{\mu} = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k)^T$ — вектор средних, $\boldsymbol{\Sigma} = (\sigma_{il})$, $i, l = 1, 2, \dots, k$ — ковариационная матрица. Множество исходных данных удобно пред-



ставить в виде: $\mathbf{x} = (\mathbf{x}_{\text{набл}}, \mathbf{x}_{\text{проп}})$, где $\mathbf{x}_{\text{набл}}$ — подмножество наблюдаемых значений факторов технологии и выходных свойств, $\mathbf{x}_{\text{проп}}$ — подмножество пропущенных значений. Таким образом, $\mathbf{x}_{\text{набл}} = (\mathbf{x}_{\text{набл.1}}, \mathbf{x}_{\text{набл.2}}, \dots, \mathbf{x}_{\text{набл.n}})$, где $\mathbf{x}_{\text{набл.i}}$ — множество переменных (технологических величин и (или) выходных характеристик) с присутствующими значениями в наблюдении $i, i = 1, 2, \dots, n$.

Первая итерация ЭМ-алгоритма предполагает вычисление начальных значений параметров. Если число комплектов наблюдений хотя бы на единицу превосходит число переменных, вектор $\boldsymbol{\mu}$ и матрицу Σ можно рассчитывать только по полным данным. В противном случае пропущенные данные заполняются с помощью одного из простых методов, например, безусловными средними. При этом по каждой переменной рассчитывается выборочное среднее по присутствующим значениям:

$$\bar{x}_j = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^n x'_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, k,$$

где n_j — число наблюдаемых значений переменной j ,

$$x'_{ij} = \begin{cases} x_{ij}, & \text{если } x_{ij} \text{ наблюдается,} \\ 0, & \text{если } x_{ij} \text{ пропущено.} \end{cases}$$

Если на m -й итерации рассчитаны параметры $\boldsymbol{\theta}^{(m)} = (\boldsymbol{\mu}^{(m)}, \Sigma^{(m)})$, на шаге E необходимо заменить пропущенные данные условными средними значениями по наблюдаемым в i -м опыте переменным $\mathbf{x}_{\text{набл.i}}$:

$$\begin{aligned} E\left(\sum_{i=1}^n x_{ij} | \mathbf{x}_{\text{набл}}, \boldsymbol{\theta}^{(m)}\right) &= \sum_{i=1}^n x_{ij}^{(m)}, \quad j = 1, 2, \dots, k, \\ E\left(\sum_{i=1}^n x_{ij} x_{il} | \mathbf{x}_{\text{набл}}, \boldsymbol{\theta}^{(m)}\right) &= \sum_{i=1}^n x_{ij}^{(m)} x_{il}^{(m)} + c_{jli}^{(m)}, \\ & \quad j, l = 1, 2, \dots, k, \end{aligned} \quad (1)$$

где

$$x_{ij}^{(m)} = \begin{cases} x_{ij}, & \text{если } x_{ij} \text{ наблюдается,} \\ E(x_{ij} | \mathbf{x}_{\text{набл}}, \boldsymbol{\theta}^{(m)}), & \text{если } x_{ij} \text{ пропущено,} \end{cases}$$

а $c_{jli}^{(m)}$ — добавочные ковариации:

$$c_{jli}^{(m)} = \begin{cases} 0, & \text{если } x_{ij} \text{ или } x_{il} \text{ наблюдаются,} \\ \text{cov}(x_{ij}, x_{il} | \mathbf{x}_{\text{набл}}, \boldsymbol{\theta}^{(m)}), & \text{если } x_{ij} \text{ и } x_{il} \text{ пропущены.} \end{cases}$$

Условные средние и добавочные ковариации $c_{jli}^{(m)}$ из формулы (1) вычисляются по текущим оценкам параметров посредством применения оператора свертки к приращенной ковариационной матрице [1] таким образом, что наблюдаемые в i -м опыте переменные рассматриваются как независимые, а те, в которых значение i пропущено — как отклики. Применение оператора свертки к некоторой симметричной матрице $A = (a_{ij})$ по строке и столбцу p приводит к получению симметрич-

ной матрицы $B = (b_{ij})$ той же размерности, что исходная, с элементами:

$$\begin{aligned} b_{pp} &= -1/a_{pp}, \\ b_{ip} &= b_{pi} = a_{ip}/a_{pp}, \quad p \neq i, \\ b_{ij} &= a_{ij} - a_{ip}a_{pj}/a_{pp}, \quad p \neq i, \quad p \neq j. \end{aligned}$$

Преимущества применения оператора свертки, по сравнению с другими способами поиска оценок метода наименьших квадратов, состоят в простоте вычислений и удобном способе извлечения полной информации о регрессии из результирующей блочной матрицы.

Обозначим исходную k -мерную переменную \mathbf{x} , дополненную слева столбцом из единиц, через \mathbf{X} . Приращенная ковариационная матрица строится следующим образом. Вычисляется произведение $n^{-1}\mathbf{X}^T\mathbf{X}$, свертка которого по строке и столбцу $j, j = 1, \dots, k$, позволяет получить регрессию всех остальных переменных на переменную с номером j . В общем случае свертка по нулевой строке и столбцу и первым r переменным позволяет получить многомерную регрессию переменных $\mathbf{x}_{r+1}, \mathbf{x}_{r+2}, \dots, \mathbf{x}_k$ на $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_r$. Результатом такой свертки будет блочная матрица:

$$\text{swp}[0, 1, \dots, r]n^{-1}\mathbf{X}^T\mathbf{X} = \begin{bmatrix} -\mathbf{F} & \mathbf{G} \\ \mathbf{G} & \mathbf{H} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где матрица \mathbf{G} , размерностью $(r+1) \times (k-r)$, j -й столбец которой содержит вычисленные методом наименьших квадратов свободный член и коэффициенты наклона регрессии \mathbf{x}_{j+r} на $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_r, j = 1, 2, \dots, k-r$; \mathbf{H} — размерностью $(k-r) \times (k-r)$ остаточная ковариационная матрица $\mathbf{x}_{r+1}, \mathbf{x}_{r+2}, \dots, \mathbf{x}_k$ при фиксированных $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_r$; элементы матрицы \mathbf{F} , размерностью $(r+1) \times (r+1)$, после умножения на соответствующие остаточные дисперсии и ковариации из матрицы \mathbf{H} , позволяют получить ковариационную матрицу коэффициентов регрессии (последнее справедливо для полных данных, в работе применялся метод оценивания данной матрицы для неполных данных [1, с. 176]).

На каждой итерации пропущенные значения заполняются новыми, более точными, по которым на шаге M заново вычисляются параметры:

$$\mu_j^{(m+1)} = n^{-1} \sum_{i=1}^n x_{ij}^{(m)}, \quad j = 1, 2, \dots, k,$$

$$\sigma_{jl}^{m+1} = n^{-1} E\left(\sum_{i=1}^m x_{ij} x_{il} | \mathbf{x}_{\text{набл}}\right) - \mu_j^{(m+1)} \mu_l^{(m+1)}, \quad j, l = 1, 2, \dots, k.$$

Процесс сходится к некоторой оптимальной совокупности оценок параметров, по которым строится окончательное уравнение регрессии. В частности, для множества (t_1, t_2, \dots, t_r) факторов технологии и одного отклика s после завершения работы ЭМ-алгоритма дополнительно проводится соответствующая свертка. При этом матрица \mathbf{G} из матрицы (2) будет иметь размерность $(r+1) \times 1$, т. е. являться вектором, содержащим свобод-

ный член и оценки параметров регрессии t_1, t_2, \dots, t_r на s , а матрица H — состоять из единственного значения, остаточной дисперсии полученной модели регрессии.

2. ПРИМЕНЕНИЕ ПРОЦЕДУРЫ ЭМ-АЛГОРИТМА К АНАЛИЗУ РЕАЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ДАННЫХ С ПРОПУСКАМИ

Для экспериментального обоснования эффективности ЭМ-алгоритма в работе была реализована следующая стратегия. На первом этапе в контексте поиска наилучшей модели зависимости исследовалось качество заполнения пропущенных значений безусловными средними, условными средними и с помощью процедуры ЭМ-алгоритма. По комплектным данным (неполные наблюдения предварительно были удалены) рассчитывались параметры основной модели зависимости. Последняя использовалась в качестве контрольной (эталонной) для сравнения с тремя моделями, которые строились многократно по массиву комплектной информации, но с искусственно вводимыми пропусками. Индексы строки и столбца пропускаемого значения генерировались с помощью датчика псевдослучайных чисел по равномерному закону. На каждом этапе число пропущенных значений увеличивалось, осуществлялся поиск модели, наиболее близкой к контрольной. Для этого определялись отклонения вектора оценок параметров каждой из рассматриваемых моделей от соответствующего вектора для контрольной модели, рассчитывались евклидовы нормы разности. По оценкам параметров моделей оценивались качество предсказания ими исходного отклика по комплектным данным и адекватность, проверялась гипотеза о равенстве выборочных распределений откликов, прогнозируемых по

каждой из трех моделей, отклику комплектной модели (по критериям χ^2 , Колмогорова — Смирнова [3]). На основании полученной информации был выбран оптимальный способ заполнения пропущенных значений и построена результирующая модель. Далее подробно изложены основные моменты и результаты проведенного анализа массива реальных производственных данных.

Исследовался массив с пропусками, содержащий набор наиболее существенных переменных, характеризующих ход и результаты технологического процесса производства 309 рулонов стали марки 08Ю. Из исходного массива было выделено 254 комплектных наблюдения. Посредством разработанной программной реализации ЭМ-алгоритма с использованием оператора свертки строились регрессионные модели зависимости выходной характеристики «глубина сферической лунки» от набора параметров сквозной технологии производства автолиста. По комплектным данным методом пошагового регрессионного анализа была построена следующая контрольная модель:

$$y = 11,543 - 4,264x_1 - 0,873x_2 - 0,002x_3 + 0,004x_4 - 0,020x_5 - 0,034x_6 - 0,035x_7 - 0,034x_8 + 0,002x_9, \quad (3)$$

где y — выходная характеристика, мм; x_1 и x_2 — массовые доли элементов химического состава, %, [C] и [Al] соответственно; x_3 — скорость полосы при горячей прокатке, м/мин; x_4 — температура конца горячей прокатки, °C; $x_5 \dots x_8$ — обжатия по клетям стана холодной прокатки: соответственно, в 1-, 2-, 4- и 5-й клетях, %; x_9 — скорость полосы на выходе первой клетки стана холодной прокатки, м/мин (свободный член измеряется в мм; коэффициенты при переменных имеют размерности, обратные размерностям соответствующих переменных,

Таблица 1

Фрагмент статистического исследования построенных моделей

$m, \%$	Вид модели	$Norma$	RSS	R	F	χ^2	$p(\chi^2)$	D	$p(D)$
0	(3)	—	61,200	0,820	49,897	—			
1	<i>A</i>	2,936	76,700	0,768	34,875	7,462	0,382	0,079	0,410
	<i>B</i>	0,205	61,200	0,820	49,828	0,529	0,999	0,028	1,000
	<i>C</i>	0,202	61,200	0,820	49,828	0,571	0,999	0,028	1,000
10	<i>A</i>	14,650	1170,000	—	—	149,051	0,000	0,724	0,000
	<i>B</i>	1,099	62,400	0,816	48,381	4,867	0,676	0,043	0,971
	<i>C</i>	0,825	62,000	0,817	48,909	1,351	0,987	0,039	0,989
25	<i>A</i>	20,342	3110,000	—	—	227,664	0,000	0,961	0,000
	<i>B</i>	3,539	90,000	0,720	26,096	19,107	0,008	0,079	0,410
	<i>C</i>	1,916	67,000	0,801	43,454	9,983	0,190	0,059	0,768
40	<i>A</i>	17,296	6580,000	—	—	242,561	0,000	0,984	0,000
	<i>B</i>	11,881	1440,000	—	—	172,694	0,000	0,838	0,000
	<i>C</i>	1,682	64,800	0,806	44,841	5,368	0,615	0,047	0,938

Примечания. *A* — модель, рассчитанная по данным, заполненным безусловными средними; *B* — по данным, заполненным условными средними; *C* — в результате работы ЭМ-алгоритма; m — процент искусственно вводимых пропусков; $Norma$ — норма разности векторов оценок параметров; RSS — остаточный квадрат; R — коэффициент множественной корреляции; F — значение статистики критерия Фишера; χ^2 — значение статистики критерия χ^2 ; D — значение статистики критерия Колмогорова — Смирнова. Доверительная вероятность обозначена символом " p ". Число групп для расчета значения критерия χ^2 — восемь, получено по формуле Штургеса [4]. При проверке адекватности моделей регрессии использовалось критическое значение критерия Фишера $F_{кр. 9, 244, p = 0,99} = 2,481$.

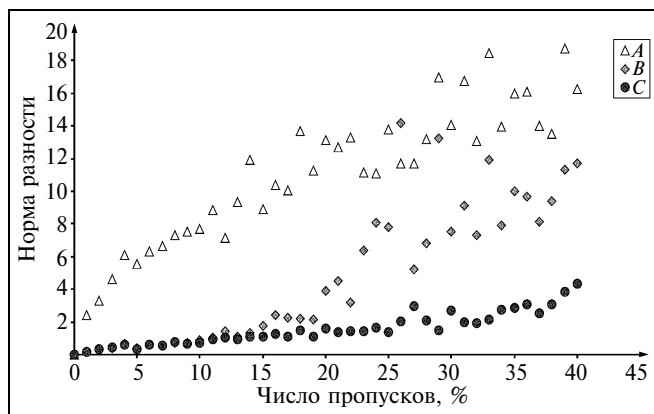


Рис. 1. Зависимость значений норм разностей векторов оценок параметров от числа пропусков

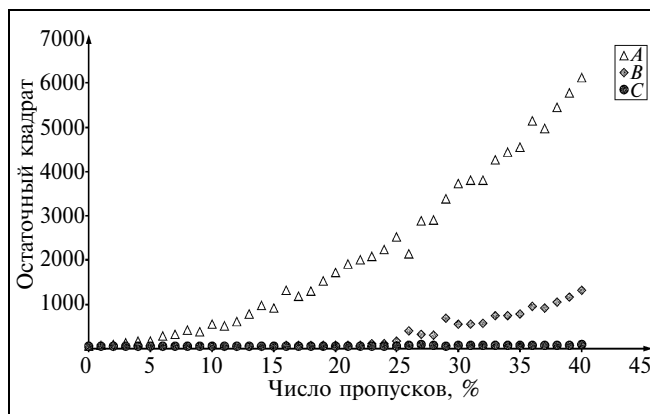


Рис. 2. Зависимость остаточных квадратов от числа пропусков

умноженные на мм). Общий квадрат для модели (3) составил 186,739.

В табл. 1 приведен фрагмент статистического исследования для различных моделей и нескольких случаев искусственно полученных данных с пропусками. В соответствии с результатами, модели вида *C* наиболее устойчивы к пропускам в данных и близки к контрольной модели. Рассчитанные по ним значения норм разностей векторов оценок параметров являются минимальными из соответствующих значений для моделей вида *B* и *C*; остаточные квадраты, коэффициенты корреляции оптимальны и менее всего отличаются от соответствующих значений для контрольной модели. Модели вида *A* наиболее неустойчивы. Уже при 1 % пропусков остаточный квадрат, рассчитанный по модели вида *A*, примерно в 1,25 раза превышает соответствующее значение для контрольной модели, а для большего количества пропусков модели вида *A* неадекватны. Модели вида *B* близки к моделям вида *C* при небольших процентах пропущенных значений, в рассматриваемом случае это справедливо для $m \leq 10$ %. Перечисленные выводы подтверждаются общими результатами исследования, которое состояло в искусственной генерации пропусков, числом от 1 до 40 %, с шагом 1 (при 40 % пропусков и выше скорость и результаты работы алгоритма начинают существенно зависеть от структуры пропусков). На каждом шаге набор из трех моделей вида *A*, *B* и *C* генерировался семь раз [4], структура пропусков изменялась случайным образом по равномерному закону, значения рассчитываемых характеристик (норм разностей векторов, остаточных квадратов и др.) усреднялись.

На рис. 1–2 для указанных в табл. 1 видов моделей приведены зависимости норм разностей векторов оценок параметров и остаточных квадратов от числа пропусков.

Как показывают рисунки, модели вида *A* характеризуются недопустимо большими значениями остаточных квадратов, а их векторы оценок параметров значительно отличаются от соответствующего вектора контрольной модели. Для числа пропусков от 30 % и выше модели вида *B* существенно неадекватны.

На практике модель должна быть пригодной для прогноза. Одним из существенных параметров оценки

качества предсказания результатов по модели является коэффициент детерминации. На рис. 3 приведена зависимость последнего от числа пропусков, для наглядности значения ординат не усреднялись. Для моделей вида *A* значения коэффициентов детерминации характеризуются большим разбросом в диапазоне, примерно, от 2 до 6 % пропусков и близки к нулю, начиная с 7 %; для моделей вида *B* в диапазоне, примерно, от 18 до 29 % пропусков наблюдается большой разброс, а затем — нулевые значения рассматриваемых коэффициентов; для моделей вида *C* неустойчивость начинает проявляться при значениях около 35 % пропусков и выше.

Реализация первого этапа показала, что оптимальной из рассмотренных является методика *EM*-алгоритма. Поэтому на втором этапе с ее помощью были заполнены пропущенные значения в исходном массиве и построена результирующая модель:

$$y = 10,697 - 3,983x_1 - 0,783x_2 - 0,003x_3 + 0,004x_4 - 0,017x_5 - 0,030x_6 - 0,040x_7 - 0,027x_8 + 0,002x_9, \quad (4)$$

где использованы введенные для модели (3) обозначения. Некоторые характеристики контрольной (3) и результирующей (4) моделей приведены в табл. 2.

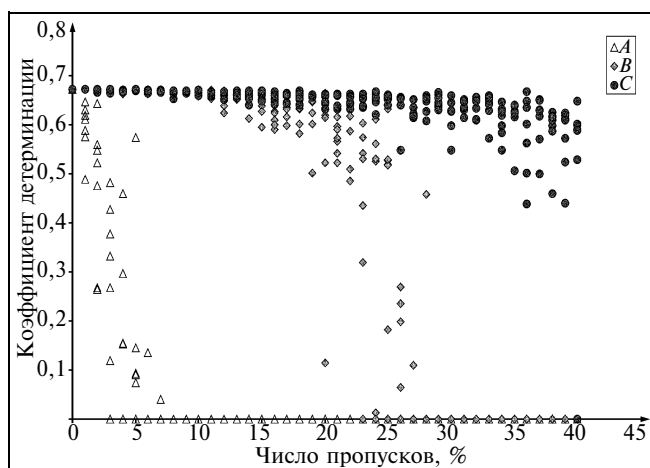


Рис. 3. Зависимость значений коэффициентов детерминации от числа пропусков

Характеристики контрольной и результирующей моделей

Контрольная модель: $n = 254$; $RSS = 61,158$; $SS = 186,739$; $R = 0,820$; $F = 49,897$; $p(F)_{9, 244} = 1,000$								
Значения t -статистик для оценок параметров, $t_{кр.244, p=0,99} = 2,596$								
t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9
-2,813	-1,241	-5,631	2,221	-2,329	-4,399	-3,673	-2,885	2,562
Доверительные интервалы для значимых оценок параметров								
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
-7,235	—	-0,003	—	—	-0,049	-0,054	-0,056	—
-1,293		-0,002			-0,019	-0,016	-0,011	
Результирующая модель: $n = 309$; $m = 2,1 \%$; $Norma = 0,420$; $RSS = 71,375$; $SS = 231,389$; $R = 0,832$; $F = 63,445$; $p(F)_{9, 299} = 1,000$.								
Значения t -статистик для оценок параметров, $t_{кр.299, p=0,99} = 2,592$								
t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9
-2,789	-1,336	-6,386	2,856	-2,128	-3,980	-4,264	-2,357	3,200
Доверительные интервалы для значимых оценок параметров								
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
-6,783	—	-0,003	0,001	—	-0,044	-0,058	—	0,001
-1,184		-0,002	0,007		-0,015	-0,021		0,004
Примечание. В таблице использованы введенные ранее обозначения; n — число наблюдений; SS — общий квадрат.								

Модели (3) и (4) адекватны и пригодны для прогнозирования и управления. Заполнение пропущенных значений привело к смещению границ доверительных интервалов для значимых оценок параметров, а также переходу отдельных параметров в разряд значимо отличающихся от нуля и, наоборот, с заданной доверительной вероятностью. Такие колебания обусловлены близостью к нулю некоторых оценок параметров (соответствующие значения t -статистик мало отличаются от критических) и оказывают незначительное влияние на конечный результат. В рассматриваемой модели на выходную характеристику в большей степени влияют скорость горячей прокатки и обжатия во второй и четвертой клетях стана холодной прокатки, об этом свидетельствуют значения соответствующих t -статистик для обеих моделей. В целом, модель (4) улучшает характеристики исходной модели, не изменяя ее структуру. На это указывает малое значение нормы разности векторов оценок параметров контрольной и результирующей моделей. Даже при небольшом общем проценте пропусков (2,1 %) заметно увеличилось значение статистики критерия Фишера (от 49,897 до 63,445) и незначительно вырос коэффициент множественной корреляции (от 0,820 до 0,832).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ данных с искусственно введенными пропусками показал максимальную устойчивость характеристик моделей, построенных путем реализации ЭМ-алго-

ритма, к числу и структурам пропусков, по сравнению с характеристиками моделей, рассчитанных по данным, пропуски в которых заполнены с помощью безусловных средних и метода Бака. Применение ЭМ-алгоритма к статистическому моделированию зависимости одного из показателей качества листовой стали от ряда факторов технологии ее производства по неполным данным показало целесообразность такого подхода для уточнения оценок параметров и совершенствования существующей модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. Литтл Р. Дж. А., Рубин Д. Б. Статистический анализ данных с пропусками. — М.: Финансы и статистика, 1990. — 336 с.
2. Бард Й. Нелинейное оценивание параметров. — М.: Статистика, 1979. — 349 с.
3. Гайдышев И. Анализ и обработка данных: специальный справочник. — СПб.: Питер, 2001. — 752 с.
4. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул. — М.: Высшая школа, 1988. — 239 с.

☎ (4742) 46-53-54;

e-mail: kuznetsov@stu.lipetsk.ru

Статья представлена к публикации членом редколлегии А. А. Дорофеюком. □



ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ЛИСТОПРОКАТНЫМ КОМПЛЕКСОМ.

Ч. II

А. Л. Генкин, А. Р. Куделин

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

Разработаны принципы исходной настройки и ее коррекции системы энергосберегающего управления листопркатным комплексом «печи—стан». Определена эффективность системы в различных энергосберегающих режимах.

ВВЕДЕНИЕ

Технологические особенности энергосберегающего управления листопркатным комплексом (ЛПК) «печи—стан», состоящим из нагревательных печей и широкополосного стана горячей прокатки, рассмотрены в работе [1]. В соответствии с ними укрупненно технологическую линию «нагрев слябов — горячая прокатка полос» можно разбить на 3 основных участка: нагревательные печи, черновую группу клетей, чистовую группу клетей с прилегающим к ее входу промежуточным рольгангом. Толщина и температура прокатываемого металла меняются, соответственно, от $H_{сл}$ и $T_{сл}$ для сляба на выходе из участка нагревательных печей до $H_{п}$ и $T_{п}$ для подката на выходе черновой группы клетей, затем в чистовой группе клетей от толщины $H_{ч} = H_{п}$ и $T_{ч}$ на ее входе до конечных значений толщины h и температуры конца прокатки $T_{к.п}$ на ее выходе. Ширина сляба B практически не меняется в линии прокатки. Принято, что в соответствующих точках технологической линии толщина металла задана и остается неизменной, а энергосберегающее управление осуществляется посредством изменения толщин (обжатий) в прокатных клетях и температуры нагрева сляба $T_{сл}$. Естественно, при этом для обеспечения координации подсистем управления отдельными участками технологической линии температура металла в соответствующих ключевых точках может изменяться в определенных пределах.

Собственно процесс энергосберегающего управления может быть разделен на две стадии: исходную настройку ЛПК «печи—стан» и ее коррекцию.

Исходная настройка должна обеспечить некоторый оптимальный в определенном смысле режим прокатки, а ее параметры определяются заранее. Коррекция исходной настройки, осуществляемая на основе получае-

мой в процессе прокатки информации, должна обеспечить поддержание оптимального режима прокатки при отклонении параметров процесса от расчетных значений.

1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ РЕЖИМОВ ИСХОДНОЙ НАСТРОЙКИ ЛПК «ПЕЧИ—СТАН»

Для оптимизации исходного состояния технологической линии «нагрев металла — горячая прокатка полос» проведено ее исследование на ЭВМ с помощью математической модели, имитирующей как процесс нагрева и прокатки металла в соответствии с методикой [1] расчета оптимальных управляющих воздействий, так и функционирование системы управления. Критерий оптимальности энергосберегающего управления исходной настройкой представлен в виде минимума суммарных удельных (на единицу массы металла) затрат на нагрев и прокатку металла:

$$Z_T + Z_3 + Z_{ок} \rightarrow \min.$$

Здесь $Z_T = C_T P_T$, $Z_3 = C_3 P_3$, $Z_{ок} = C_{ок} P_{ок}$, где Z_T , C_T и P_T — затраты, цена и расход топлива в нагревательных печах; Z_3 , C_3 и P_3 — затраты, цена и расход электроэнергии в прокатных клетях; $Z_{ок}$, $C_{ок}$ и $P_{ок}$ — затраты, цена и расход металла, ушедшего в окалину при его нагреве в печах.

Область допустимых управлений определена ограничениями X_{ji} на энергосиловые и геометрические параметры прокатных клетей x_{ji} :

$$x_{ji} \leq X_{ji},$$

где i — номер клетки ($i = 1, 2, \dots, k$); j — номер контролируемого параметра ($j = 1, 2, \dots, n$); k — число клетей; n — число контролируемых параметров i -й клетки.

В целом в процессе обработки металла в ЛПК «печи—стан» могут быть реализованы следующие варианты энергосберегающего режима исходной настройки клетей [2]:

Топливосберегающий режим. Может быть реализован в черновых и чистовых клетях для минимизации тепловых потерь. Обеспечивает минимальный расход топлива и угара металла в нагревательных печах.

Электросберегающий режим. Может быть реализован в черновых и чистовых клетях для обеспечения минимального расхода электроэнергии в главных приводах прокатных клетей.

Режим полной загрузки. Может быть реализован для обеспечения полной загрузки клетей группы по какому-либо параметру ($x_{ji} = X_{ji}$). Предназначен, в основном, для черновой группы клетей, так как чистовая группа не может быть полностью загружена по технологическим соображениям.

Режим равномерной загрузки. Может быть реализован в черновых и чистовых клетях для обеспечения равномерной загрузки всех клетей группы по какому-либо из наиболее значимых параметров, например, усилию прокатки P_i в каждой i -й клетке.

Режим контролируемой прокатки. Может быть реализован в черновых и чистовых клетях для обеспечения заданного значения температуры металла на входе и выходе соответствующей группы клетей.

Все перечисленные режимы целесообразно оценивать, сравнивая с режимом прокатки с фиксированными обжатиями. Этот режим не является энергосберегающим и в настоящее время реализуется в черновых и чистовых клетях в соответствии с технологической инструкцией на нагрев и прокатку металла.

С учетом вышеизложенного, а также исходя из того, что суммарные затраты на нагрев и прокатку металла в большей степени определяются изменением режима обжатий в черновой группе, чем в чистовой, очевидно, что черновая группа является более представительной с точки зрения выбора режимов исходной настройки прокатных клетей [3]. В связи с этим графическая интерпретация описанных выше режимов исходной настройки далее представлена для черновой группы клетей. Качественный характер иллюстраций для условий прокатки в чистовой группе клетей имеет аналогичный вид.

При исходной настройке технологической линии «нагрев металла — черновая прокатка полос» температура металла в ключевых точках может изменяться в определенных пределах [1]:

$$T_{сл}^{\min} \leq T_{сл} \leq T_{сл}^{\max}, \quad T_{п}^{\min} \leq T_{п} \leq T_{п}^{\max}, \quad (1)$$

где $T_{сл}^{\min}$, $T_{п}^{\min}$ — минимальные значения температур $T_{сл}$ и $T_{п}$, обеспечение которых происходит без перегрузки оборудования стана; $T_{сл}^{\max}$, $T_{п}^{\max}$ — максимально возможная по условиям оплавления металла температура $T_{сл}$ и соответствующая ей температура $T_{п}$.

Основные показатели энергосберегающих режимов прокатки представлены в таблице, где $T_{сл}^*$ и $T_{п}^*$ — заданные значения температур $T_{сл}$ и $T_{п}$.

Из теории и практики прокатного производства известно, что минимальные потери тепла при обработке металла в черновой группе имеют место при максимальной загрузке ее последних по ходу прокатки клетей с соответствующим уменьшением загрузки первых клетей. Уменьшение обжатий в последних клетях и перераспределение их в сторону первых клетей приводит к увеличению потерь тепла в черновой группе. С учетом этой особенности разработана эвристическая процедура изменения обжатий в прокатных клетях, обеспечивающая перераспределение загрузки клетей в соответствии с выбранным критерием оптимальности (см. таблицу).

В работе [1] показано, что при заданном значении $T_{п}^*$ топливосберегающий режим обеспечивает минимальные потери тепла в технологической линии «нагрев металла — черновая прокатка полос», минимизируя тем самым температуру $T_{сл}$ и суммарные затраты на топливо и ушедший в окалину металл при его нагреве в печах. С учетом изложенного реализация топливосберегающего режима обеспечивается перераспределением загрузки в сторону последних клетей.

Электросберегающий режим требует наиболее высокого уровня температуры раската, снижая тем самым грузку электропривода и минимизируя затраты на электроэнергию в прокатных клетях. Очевидно, что в этом случае температура $T_{сл}$ не должна превышать максимально возможную по условиям оплавления металла температуру нагрева слябов $T_{сл}^{\max}$. Реализация электросберегающего режима обеспечивается перераспределением загрузки в сторону первых клетей.

Реализация более низких значений $T_{п}^*$ обеспечивается для топливосберегающего режима максимальной загрузкой все большего числа последних клетей, а для электросберегающего режима — первых клетей. Очевидно, что при полной загрузке клетей будут иметь место минимальные значения $T_{п}^{\min}$ и $T_{сл}^{\min}$ (точка a на рис. 2 в первой части настоящей работы [1]). Таким образом, режим исходной настройки с полной загрузкой клетей черновой группы обеспечивает наиболее низкий уровень температуры металла во всех черновых клетях и нагревательных печах. Этот режим соответствует минимальному расходу топлива и угару металла в печах, однако его особенность состоит в однозначном соответ-

Оптимальные (в соответствии с определенными критериями) режимы прокатки и соответствующие им функции цели и дополнительные условия

Режим	Функция цели	Дополнительные условия
Топливосберегающий	$Z_1 \rightarrow \min$	$T_{п} = T_{п}^*$
Электросберегающий	$Z_3 \rightarrow \min$	$T_{п} = T_{п}^*$
Полная загрузка клетей	$x_{ji} = X_{ji}$	$T_{п} = T_{п}^{\min}, T_{сл} = T_{сл}^{\min}$
Равномерная загрузка клетей	$P_i = \text{const}$	$T_{п} = T_{п}^*$
Контролируемая прокатка	$Z_3 \rightarrow \min$	$T_{п} = T_{п}^*, T_{сл} = T_{сл}^*$

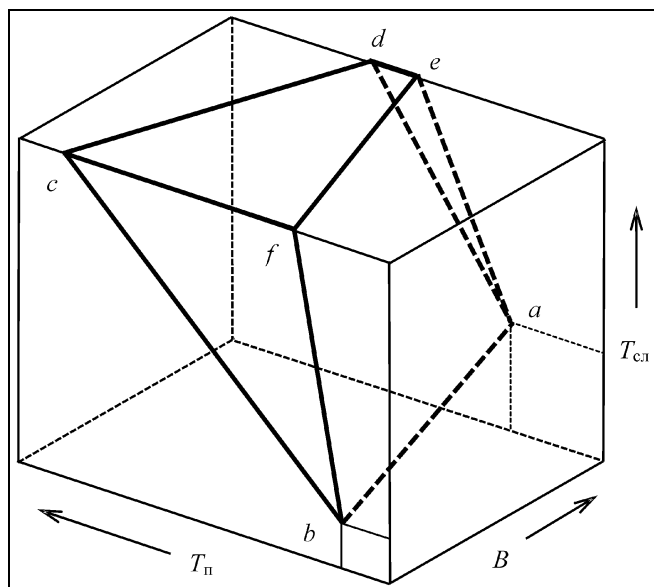


Рис. 1. Графическая интерпретация различных режимов исходной настройки клетей

вии температур $T_{сл}$ и $T_{п}$, обеспечение которых происходит без перегрузки оборудования стана [2]. При существующем в настоящее время соотношении цен $C_{э}/C_{т}$ рассмотренный режим (с учетом приведенной выше особенности) обеспечивает минимальные суммарные затраты на нагрев и прокатку металла [1].

Реализация режима прокатки с равномерной нагрузкой клетей обеспечивает, как следует из его названия, равномерность распределения усилий прокатки во всех клетях черновой группы.

Режим контролируемой прокатки подразумевает нагрев сляба в печи до определенной заданной температуры $T_{сл}^*$. В этом случае снижать затраты на топливо и угар металла не представляется возможным из-за невозможности изменения температуры $T_{сл}$. Энергосбережение для указанного режима заключается в перераспределении обжатий по клетям таким образом, чтобы обеспечить заданную температуру $T_{п}^*$ подката на выходе черновой группы клетей при минимальном расходе электроэнергии в прокатных клетях.

Графическая интерпретация различных режимов исходной настройки клетей представлена на рис. 1 [4].

Пространство возможных состояний параметров прокатки ограничено многогранником $abcdef$. Параметры прокатки, лежащие на грани $abcd$, соответствуют топливосберегающему режиму, а лежащие на грани $abfe$ — электросберегающему режиму. Грань $cdef$ характеризует ограничение температуры нагрева металла в печи. Ребро ab отображает режим полной загрузки всех клетей черновой группы. Таким образом, для каждой точки множества $(B, T_{п}, T_{сл})$, заключенного в многограннике $abcdef$, может быть рассчитана исходная настройка режима обжатий, обеспечивающая выбранные координаты параметров прокатки.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРРЕКЦИИ ИСХОДНОЙ НАСТРОЙКИ

Реализация энергосберегающего режима исходной настройки обеспечивает оптимальный режим обжатий в прокатных клетях в соответствии с выбранным критерием оптимальности при условии нагрева слябов в печах до рекомендуемой температуры нагрева $T_{сл}$. Если же реальная температура нагрева сляба по тем или иным причинам отклоняется от уставки температуры $T_{сл}$, температура раската в клетях не будет соответствовать рассчитанным значениям, что может привести к отклонению температуры подката на выходе группы клетей и даже к перегрузке клетей.

Коррекция исходной настройки в реальном масштабе времени может быть осуществлена путем перераспределения обжатий в отдельных клетях на основе косвенного определения температуры металла по измеренным энергосиловым параметрам прокатки. Предлагаются два способа стабилизации температуры подката на выходе из черновой группы клетей.

1. Для черновой группы с последовательным расположением клетей регулирование температуры металла в реальном масштабе времени осуществляется в соответствии с принципами, изложенными в работе [5]. Черновая группа условно разбивается на ряд областей управления, в каждую из которых входят три клетки: i — измерительная, $(i + 1)$ — регулирующая, $(i + 2)$ — контролирующая. Для первой области i -я клеть — это печь, для последней области $(i + 2)$ -я клеть — последняя клеть черновой группы. Так, например, для пятиклетевой черновой группы можно выделить 4 области управления:

- выход печи (i) — 1-я клеть ($i + 1$) — выход 2-й клетки ($i + 2$);
- выход 1-ой клетки (i) — 2-я клеть ($i + 1$) — выход 3-й клетки ($i + 2$);
- выход 2-ой клетки (i) — 3-я клеть ($i + 1$) — выход 4-й клетки ($i + 2$);
- выход 3-ей клетки (i) — 4-я клеть ($i + 1$) — выход 5-й клетки ($i + 2$).

Температура металла в клетки определяется косвенным образом на основе измеренного значения мощности (либо усилия) прокатки. Регулирование осуществляется при отклонении измеренной косвенным образом температуры в i -й клетки от расчетного значения, определенного при исходной настройке. Корректирующее воздействие для нажимного устройства $(i + 1)$ -ой клетки с целью изменения толщины раската на ее выходе рассчитывается таким образом, чтобы на выходе $(i + 2)$ -й клетки получить минимально возможное отклонение температуры металла от расчетного значения при неизменной (в пределах допуска) толщине раската на выходе этой клетки. Регулирование осуществляется с учетом приведенных ограничений, используемых при исходной настройке, а также дополнительных ограничений на значение и скорость перемещения нажимных винтов.

2. Для черновой группы, состоящей из двух реверсивных клетей («дуо» и «кварто»), предложена концепция двухканального («грубого» и «тонкого») регулирования [6]. Функционирование канала «грубого» регулирования основано на косвенном измерении температуры

прокатываемого металла в функции тока якоря главного привода клетки «дуо» с использованием адаптивной настройки коэффициентов в функции отклонения измеренной температуры подката от заданной. Перераспределение обжатий в клетки «кварто» с использованием канала «тонкого» регулирования основано на непосредственном измерении температуры металла до и после клетки «кварто» с помощью адаптивной модели, учитывающей основные параметры прокатки.

Отметим, что точность косвенного метода определения температуры металла зависит от точности температурных моделей и полного учета всех возмущающих факторов, влияющих на температуру металла в процессе прокатки. Указанные факторы трудно учесть с помощью коэффициентов температурных моделей, что, безусловно, сказывается на точности регулирования. С учетом изложенного, предусматривается коррекция расчетных значений параметров прокатки по измеренной температуре подката с помощью датчика температуры (пирометра), установленного на выходе черновой группы клетей.

Если имеет место отклонение измеренной температуры подката на выходе из черновой группы от ее заданного значения, формируется сигнал коррекции, изменяющий расчетные значения температуры металла на выходе из печи и в каждой i -й клетки черновой группы.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЛПК «ПЕЧИ—СТАН»

По функциональному признаку система управления ЛПК «печи—стан» с точки зрения энергосбережения может быть разделена на отдельные подсистемы управления черновой и чистовой группами клетей. Для согласованного функционирования отдельных подсистем необходимо воспользоваться методологией системного анализа, в соответствии с которой устанавливаются возможные варианты реализации управления этими подсистемами, связь между ними и выбирается структура системы управления, отвечающая требованиям максимальной эффективности.

Как было отмечено, максимальной эффективности системы соответствуют минимальные суммарные удельные затраты на нагрев и прокатку металла. Выбирая оптимальную стратегию управления чистовой группой, следует учесть ее отличия от черновой группы. Прежде всего, скорость прокатки в каждой клетке непрерывной чистовой группы не постоянна, а зависит от толщины раската в этой клетке, что затрудняет моделирование энергосберегающего режима. Далее, на изменение параметров прокатки в чистовой группе клетей накладываются дополнительные ограничения, не позволяющие варьировать толщину раската в широких пределах. Наконец, пропускная способность чистовой группы может существенно отличаться от пропускной способности черновой группы и участка нагревательных клетей.

Исходя из изложенной общей стратегии оптимизации технологической линии «нагрев слэбов — горячая прокатка полос», в работах [2, 7] предлагается структура системы исходной настройки отдельных звеньев технологической линии и их координации для обеспечения минимальных суммарных затрат на нагрев и прокатку металла (рис. 2). Принято, что стан оборудован установ-

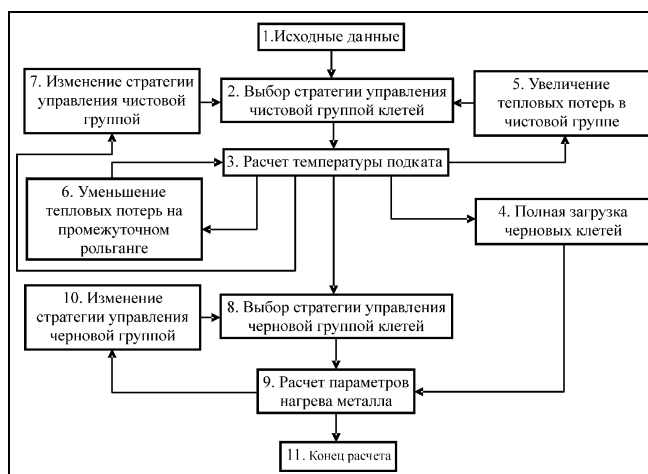


Рис. 2. Структура энергосберегающей системы управления ЛПК «печи—стан»

ками принудительного охлаждения металла в межклетевых промежутках чистовой группы, а промежуточный рольганг — управляемыми теплоизолирующими экранами для сокращения потерь тепла. Нагревательные печи позволяют осуществлять дифференцированный нагрев слэбов.

Система должна удовлетворять условиям (1), а также следующим: $T_{к.п} = T_{к.п}^*$, $V \leq V_{\max}$, $P_{п} \leq P_{с}$, где $T_{к.п}^*$ — заданное значение температуры полосы на выходе чистовой группы (температуры конца прокатки); V и V_{\max} — соответственно, реализованная и максимально возможная скорости прокатки в чистовой группе клетей; $P_{п}$ — производительность печей; $P_{с}$ — производительность стана (определяется производительностью чистовой группы клетей). Обозначения остальных параметров приведены выше.

Первоначально в систему (блок 1, см. рис. 2) вводятся следующие исходные данные прокатываемого типа-размера: $H_{сл}$, $H_{п}$, $T_{к.п}^*$, $T_{п}^{\min}$, $T_{п}^{\max}$, $T_{сл}^{\min}$, $T_{сл}^{\max}$, B , V_{\max} , а также максимально возможная производительность печей $P_{п}^{\max}$, соответствующая температуре нагрева $T_{сл}^{\min}$ при полной загрузке черновых клетей.

Для обеспечения максимальной производительности стана скорость прокатки в чистовой группе V выбирается максимальной. Затем по усмотрению оператора чистовой группы стана выбирается один из перечисленных режимов исходной настройки чистовых клетей (блок 2) и рассчитывается температура подката на выходе из черновой группы $T_{п}$ (блок 3). Если $T_{п} = T_{п}^{\min}$, то в черновой группе клетей может быть реализован наиболее экономичный режим исходной настройки с полной загрузкой клетей (блок 4).

Пониженное значение температуры подката $T_{п} < T_{п}^{\min}$ не позволяет осуществить прокатку металла в черновой группе без перегрузки клетей. Для повышения температуры $T_{п}$ до уровня $T_{п}^{\min}$ необходимо увеличить потери



тепла в чистовой группе клеток (блок 5). Это может быть достигнуто уменьшением скорости прокатки в чистовой группе $V < V_{\max}$, реализацией принудительного межклетевого охлаждения в чистовой группе или выбором нового режима исходной настройки чистовых клеток, обеспечивающего более высокое значение $T_{\text{п}}$. Отметим, что уменьшать скорость прокатки в чистовой группе целесообразно только в том случае, когда производительность стана больше производительности печей $\Pi_{\text{п}}^{\max}$.

При повышенном значении температуры подката $T_{\text{п}} > T_{\text{п}}^{\min}$ желательно понизить $T_{\text{п}}$ до уровня $T_{\text{п}}^{\min}$. Уменьшение потерь тепла может быть осуществлено регулированием положения теплоизолирующих экранов на промежуточном рольганге (блок 6). При полной реализации возможностей теплоизолирующих экранов тепловые потери на промежуточном рольганге будут минимальными. Если в результате окажется, что температура подката превышает максимально допустимое значение ($T_{\text{п}} > T_{\text{п}}^{\max}$), необходимо выбрать новый режим исходной настройки в чистовой группе клеток, обеспечивающий более низкое значение $T_{\text{п}}$ (блок 7).

При условии $T_{\text{п}} \leq T_{\text{п}}^{\max}$ в соответствии со сложившейся ситуацией оператором черновой группы выбирается один из режимов исходной настройки черновых клеток (блок 8) и рассчитывается требуемая температура нагрева сляба $T_{\text{сл}}$ (блок 9). Если температура $T_{\text{сл}}$ превышает максимально возможную по условиям оплавления металла величину $T_{\text{сл}}^{\max}$, осуществляется выбор нового режима исходной настройки черновых клеток, обеспечивающего более низкую температуру нагрева.

При выполнении условия $T_{\text{сл}} \leq T_{\text{сл}}^{\max}$ проверяется соответствие пропускной способности печей и стана. Если производительность печей превышает производительность стана, в блоке 10 необходимо выбрать новый режим исходной настройки черновых клеток, обеспечивающий более низкую производительность печей. Выполнение требования $\Pi_{\text{п}} \leq \Pi_{\text{с}}$ означает удовлетворение системы всем вышеперечисленным условиям и, таким образом, возможность нагрева и прокатки металла в соответствии с критерием минимальных суммарных затрат и обеспечения четкой координации всех звеньев технологической линии (блок 11).

4. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ЛПК «ПЕЧИ—СТАН»

Эффективность создания энергосберегающей системы управления технологическим процессом можно рассматривать как с точки зрения энергетической и экологической безопасности производства, так и, собственно, оценки возможности изменения экономических показателей при реализации энергосберегающей технологии. Использование энергосберегающего управления улучшает энергоэкологическое качество производства, которое заключается, в уменьшении потребности в энергоносителях, в возможности замены, при необходимости,

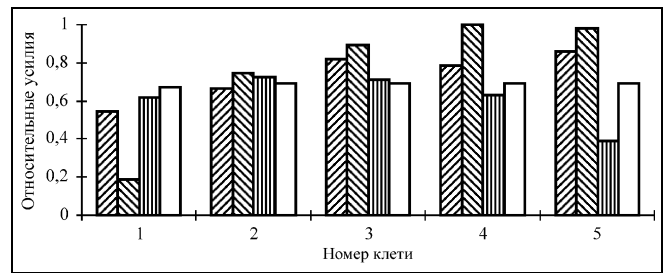


Рис. 3. Изменение относительных усилий по клетям черновой группы при различных режимах прокатки:

▨ — фиксированные обжатия; ▩ — топливосберегающий режим; □ — электросберегающий режим; □ — равномерная нагрузка клеток

одного вида энергоресурсов другим (например, газа на электроэнергию) и, уменьшением влияния производства на окружающую среду [8, 9]. В рамках данной работы ограничимся подробным исследованием влияния энергосберегающего управления на технико-экономические показатели производства горячекатаных полос.

Стремительный рост цен на энергоресурсы во всем мире и возрастание энергетической составляющей в себестоимости металла позволяет рассматривать энергосбережение как мощный резерв повышения конкурентоспособности металлургических заводов и производимой ими металлопродукции. Опыт Института проблем управления РАН и ОАО «Черметавтоматика» по разработке инновационных мероприятий для металлургической промышленности показал возможность и эффективность применения компьютерных и информационных технологий и средств их реализации при решении задач энергосбережения для ЛПК «печи—стан». Такой опыт был приобретен на базе представленных результатов в виде алгоритмического и программного обеспечения СУЭТ (Система управления энергосберегающей технологией) для листовых станов горячей прокатки, использующих слябы, поступающие из нагревательных печей [4, 10].

Структурно программное обеспечение СУЭТ построено в соответствии с модульным принципом: каждый модуль реализует один из режимов исходной настройки или ее коррекции. Такое построение облегчает сравнительный анализ того или иного режима прокатки и выбор наиболее приемлемого в различных производственных ситуациях.

Обработка результатов моделирования, проведенного с помощью СУЭТ, позволила установить количественную и качественную зависимости энергетических расходов от режимов прокатки. На рис. 3 представлено распределение относительных (по сравнению с максимально возможным значением) усилий прокатки по клетям черновой группы при использовании различных режимов исходной настройки.

Внедрение энергосберегающей технологии неизбежно ведет к нарушению равномерности распределения энергосиловых параметров по прокатным клетям. Можно видеть, что нагрузка клеток при топливо- и электросберегающих режимах сильно смещена: в первом случае — в сторону последних клеток, во втором случае —

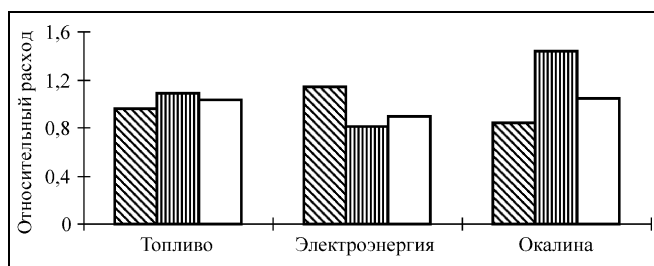


Рис. 4. Изменение относительных расходов при различных режимах прокатки:

▨ — топливосберегающий режим; ▤ — электросберегающий режим; □ — равномерная загрузка клетей

в сторону первых клетей черновой группы. Отсюда можно сделать вывод, что внедрение указанных режимов с полным использованием диапазона по перераспределению обжатий возможно лишь при работе автоматизированных систем управления, обеспечивающих надежное управление процессом и выполнение всех условий ограничения по энерготехнологическим параметрам. Однако на практике и в этом случае необходимо иметь запас регулирования по толщине и температуре раската для подсистем, работающих в реальном масштабе времени, или для предоставления оперативному персоналу черновой группы возможности ручного вмешательства в технологический процесс. Из сказанного следует, что в энергосберегающих системах управления необходимо предусматривать возможность равномерной загрузки клетей черновой группы стана.

Программное обеспечение СУЭТ позволяет реализовать режим прокатки с равномерной загрузкой клетей по какому-либо из энергосиловых параметров, в данном случае по усилию прокатки. Эффективность этого режима заключается в том, что относительные усилия прокатки практически постоянны во всех клетях черновой группы (см. рис. 3).

Эффективность энергосберегающего управления может быть наглядно представлена в сравнении с режимом прокатки с фиксированными обжатиями (в соответствии с технологическими инструкциями). Относительный (по сравнению с режимом прокатки с фиксированными обжатиями) расход топлива (газа), электроэнергии и металла, ушедшего в окалину, может быть меньше или больше единицы. В первом случае имеет место экономия соответствующего ресурса, а во втором — перерасход. Из представленных на рис. 4 данных видно, что относительный (по сравнению с режимом прокатки с фиксированными обжатиями) расход топлива может быть снижен на 4 % в топливосберегающем режиме, а относительный расход электроэнергии — на 19 % в электросберегающем режиме. С уменьшением ширины сляба B увеличивается диапазон регулируемости перераспределения обжатий в клетях черновой группы (см. рис. 1), поскольку ширина сляба B является одним из ограничений области допустимых управлений при исходной настройке клетей [2]. В связи с этим при прокатке слябов минимальной ширины топливосберегающий режим позволяет снизить относительный расход топлива на 8 %, а электроэнергии — в электросберегающем режиме — на 20 %.

Реализация режима исходной настройки с равномерной загрузкой клетей, обеспечивающего более стабильное управление в реальном масштабе времени, несколько снижает эффективность энергосберегающего управления по сравнению как с топливосберегающим, так и с электросберегающим режимами (см. рис. 4). Относительный расход металла, ушедшего в окалину, существенно зависит от температуры $T_{сл}$, уменьшаясь в топливосберегающем режиме и увеличиваясь в режимах с равномерной загрузкой и электросберегающем.

При существующем соотношении цен на электроэнергию и топливо суммарные затраты на нагрев и прокатку металла существенно выше по сравнению с режимом прокатки с фиксированными обжатиями при реализации электросберегающего режима (11–12 % в зависимости от ширины сляба) и ниже при реализации топливосберегающего режима (соответственно, 4–9 %). Это объясняется существенным преобладанием затрат на топливо в структуре суммарных затрат. Таким образом, реализация топливосберегающего режима исходной настройки черновых клетей, обеспечивая минимальную температуру нагрева слябов, обеспечивает тем самым минимальные затраты на топливо и потери от утара металла при его нагреве. В то же время первоочередное использование одного из энергосберегающих режимов может быть обусловлено дефицитом какого-либо энергоресурса (топлива или электроэнергии).

Анализ эффективности коррекции исходной настройки в реальном масштабе времени при разбивке черновой группы клетей на ряд областей управления показал, что эффективность регулирования температуры в каждой области управления повышается с уменьшением ширины раската, а наиболее эффективны последние по ходу прокатки клетки черновой группы. Отметим, что коррекция исходной настройки позволяет практически стабилизировать температуру подката при изменении температуры нагрева сляба в диапазоне ± 30 °C, а при отсутствии указанной коррекции отклонение температуры подката составило бы ± 18 – 22 °C [10]. Таким образом, регулирование температуры подката в темпе с процессом прокатки может являться дополнительной целью оптимального управления, так как стабильность температуры подката создает возможность воспроизводства условий прокатки в чистой группе клетей.

Для реализации оптимального управления черновой группой широкополосного стана горячей прокатки с применением энергосберегающей технологии разработана структурная схема АСУ с оптимизацией режимов прокатки [10]. В основу АСУ положена двухуровневая структура, обеспечивающая управление температурой металла как в режиме прогноза, так и в реальном масштабе времени. К верхнему уровню относится подсистема оптимизации исходной настройки технологической линии, т. е. определение оптимальных (в смысле минимума энергетических затрат) значений температуры и толщины металла во всех звеньях линии. На нижнем уровне осуществляется коррекция исходной настройки и обработка текущей информации. Иерархическая структура системы и режим ее работы позволяют, при необходимости, использовать ее технические и программные средства по уровням независимо друг от друга.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во второй части рассмотрены различные варианты энергосберегающих режимов исходной настройки клетей, сформулированы соответствующие функции цели и дополнительные условия.

Предложены методы коррекции исходной настройки ЛПК «печи—стан» в реальном масштабе времени, основанные на косвенном измерении параметров прокатки.

Сформулированы принципы построения энергосберегающих систем управления ЛПК «печи—стан», основанные на регулировании температуры металла в ключевых точках технологической линии в соответствии с локальными критериями оптимальности отдельных звеньев ЛПК и четкой их координацией.

Определена эффективность энергосберегающего управления с точки зрения сокращения энергоресурсов и суммарных удельных затрат на нагрев и прокатку металла, а также возможности стабилизации температуры подката.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Генкин А. Л., Куделин А. Р.* Проблемы энергосберегающего управления листопрокатным комплексом. Ч. I // Проблемы управления. — 2006. — № 6. — С. 50—54.
2. *Генкин А. Л.* Принципы построения энергосберегающих систем управления листовыми станами горячей прокатки // Тр. Ин-та пробл. упр. РАН. — М.; 1998. — Т. 1. — С. 40—47.
3. *Системы и средства автоматизации энергосберегающей технологии в прокатном производстве / Ю. П. Божко, А. Л. Генкин, Я. С. Масальский, Л. Ф. Ромашкевич //*

Черная металлургия: Бюлл. ин-та «Черметинформация». — 1987. — Вып. 23. — С. 21—36.

4. *Генкин А. Л., Куделин А. Р.* Система управления для реализации энергосберегающей технологии в прокатном производстве // Приборы и системы управления. — 1997. — № 10. — С. 9—11.
5. *А. с. 1444003 СССР.* Устройство регулирования температуры подката для широкополосного стана горячей прокатки / Ю. П. Божко, Н. П. Бычков, Д. Н. Добронравов и др. // Открытия. Изобретения. — 1988. — № 46. — С. 44.
6. *Stabilization system for the bar temperature in the roughing train of the strip mill / A. L. Genkin, A. R. Kudelin, Yu. P. Bozhko, et al. // Preprints of the 8-th IFAC Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processin — Sun City, South Africa. — 1995. — P. 115—117.*
7. *Власов С. А., Генкин А. Л., Волочек Н. Г.* Как решить актуальные проблемы автоматизации металлургических предприятий России // Промышленность России. — 2000. — № 1. — С. 47—54.
8. *Компьютерные технологии для инновационных мероприятий по экологичности и энергосбережению в металлургическом производстве / Т. И. Овчинникова, С. О. Ефимов, С. А. Власов, А. Л. Генкин // Автоматизация в промышленности. — 2005. — № 1. — С. 10—12.*
9. *Колесников Е. В., Тригорлый С. В.* Энергорасточительство — угроза энергетической безопасности // Промышленная энергетика. — 2005. — № 4. — С. 2—6.
10. *Генкин А. Л., Власов С. А., Масальский Я. С.* Возможности энергосберегающего управления листопрокатным комплексом // Автоматизация в промышленности. — 2003. — № 3. — С. 44—47.

☎ (495) 334-87-59;

e-mail: genfone@ipu.ru

Статья представлена к публикации членом редколлегии А. Г. Бутковским. □

Новые книги

Дилигенский Н. В. Построение и идентификация математических моделей производственных систем. — Самара: Офорт, 2005. — 126 с.

Динамические системы и проблемы управления. — Екатеринбург: ИМЭХ, 2005. — 240 с.

Доррер Г. А. Методы моделирования дискретных систем. — Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2005. — 171 с.

Искаков М. Б. Модели и методы управления привлечением вкладов в банковскую сберегательную систему. — М.: ИПУ, 2006. — 156 с.

История и синергетика: методология исследования. — М.: URSS, 2005. — 180 с.

Карабутов Н. Н. Адаптивная идентификация систем. — М.: URSS, 2006. — 383 с.

Мелехин В. Ф. Вычислительные машины, системы и сети. — М.: Academia, 2006. — 555 с.

Синергетические методы управления сложными системами. — М.: URSS, 2006. — 300 с.

Сороко Э. М. Золотые сечения, процессы самоорганизации и эволюции систем. — М.: URSS, 2006. — 264 с.

Спектральные последовательности в топологии. — М.; Ижевск: Ин-т компьютер. исслед., 2005. — 631 с.

Труханов В. М. Надежность сложных технических систем типа подвижных установок на этапах производства и эксплуатации. — М.: Машиностроение-1, 2005. — 443 с.

Управление качеством электроэнергии. — М.: Изд. дом МЭИ, 2006. — 319 с.

Финн В. К. Интеллектуальные системы и общество. — М.: URSS, 2006. — 356 с.

Фридман Л. М. Величины и числа. — М.: URSS, 2006. — 223 с.

Шамис А. Л. Пути моделирования мышления. — М.: URSS, 2006. — 333 с.

Щенникова Е. В. Устойчивоподобные свойства решений нелинейных управляемых систем. — М.: РУДН, 2006. — 112 с.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА РАННЕЙ И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ КЛИНИЧЕСКИХ ФОРМ БОЛЕЗНИ ПАРКИНСОНА¹

О. Е. Хуторская

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

Описана система, работа которой основана на методике спектрально-статистической обработки специального сигнала, выделенного из электромиограммы (ЭМГ). Получены количественные оценки различных параметров ЭМГ, на основе которых ставится диагноз. Автоматизированная система применена для статистической обработки количественных оценок различных параметров ЭМГ и определения основной симптоматики болезни Паркинсона.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время возрастает значение информационного обеспечения различных медицинских технологий. В клинических учреждениях уже не редкость применение многопользовательских автоматизированных информационных систем, содержащих полную информацию об амбулаторном и стационарном медицинском обслуживании пациентов лечебно-профилактических учреждений [1, 2]. Однако, по-прежнему, наибольший интерес для практического здравоохранения представляют системы для диагностики и дифференциальной диагностики заболеваний, назначения и коррекции лечебных мероприятий, прогнозирования течения заболеваний и их исходов. Для принятия решений могут использоваться самые разнообразные данные — анамнез, клинический осмотр, результаты лабораторных тестов и сложных функциональных методов. Несмотря на многочисленность диагностических методик, использующих ЭВМ, практически нет систем автоматизированной диагностики, помогающих врачам в постановке верного диагноза. Особенно актуальны такие системы для целого ряда заболеваний, имеющих одинаковую симптоматику, что затрудняет их объективную диагностику.

Например, в неврологической клинике известен ряд заболеваний, при которых наблюдаются экстрапирамидные синдромы. Так, синдром паркинсонизма может

проявляться при поражении экстрапирамидной системы, обусловленным энцефалитом, избыточным приемом лекарственных препаратов, атеросклерозом сосудов головного мозга или травмами головного мозга. Кроме того, синдром паркинсонизма часто встречается при дегенеративных и наследственных заболеваниях центральной нервной системы (ЦНС), таких как болезнь Альцгеймера, хорея Гентингтона, мультисистемная атрофия, эссенциальный тремор, идиопатическая дистония и др. Понятие «паркинсонизм» применяется к любому синдрому, при котором наблюдаются характерные для болезни Паркинсона (БП) неврологические нарушения [3–5].

Болезнь Паркинсона — одно из наиболее распространенных неврологических заболеваний. Эпидемиологические исследования указывают на то, что оно наблюдается во всех этнических группах и встречается с равной частотой у мужчин и женщин. По данным различных российских и зарубежных источников, частота БП в различных возрастных группах колеблется от 53 до 229 случаев на 100 тыс. населения [3]. Среди дегенеративных заболеваний головного мозга БП занимает особое место в связи с ее распространенностью, резко увеличивающейся с возрастом, известностью ведущих биохимических механизмов и определенной эффективностью заместительной терапии [6].

Как правило, БП имеет медленное течение, так что на ранних стадиях заболевание может не диагностироваться в течение нескольких лет. Наиболее распространенный метод диагностики — клинический. Для характеристики стадий БП в неврологических клиниках используется ряд шкал: оценочная шкала Хёна и Яра

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 05-08-01140-а).



(Hoehn and Yahr Rating Scale), унифицированная рейтинговая шкала оценки проявлений паркинсонизма (Unified Parkinson's Disease Rating Scale — UPDRS) и др. Некоторые шкалы тестируют уровень дневной активности и адаптации больного (Activity of Daily Living Scale). При всех несомненных достоинствах, клинический метод обладает существенным недостатком — субъективизмом оценок, что при БП усугубляется еще и высоким порогом распознавания симптомов самим пациентом. В последнее время наблюдается тенденция роста числа людей с таким недугом и характерно снижение возраста таких больных. В связи с этим проблема постановки более точного диагноза и выявления болезни на ранней стадии стала особо актуальной. Поэтому большое значение придается разработке инструментальных методов ранней диагностики БП, а также способов объективного контроля эффективности лечения. В настоящее время для распознавания БП применяются визуализирующие методы исследования: компьютерная томография (КТ), магнитно-резонансная томография (МРТ), позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ), транскраниальное ультразвуковое сканирование мозга [7, 8]. Метод МРТ головного мозга позволяет выявлять только неспецифические и едва уловимые изменения. Во многих случаях при БП отсутствуют изменения на изображениях КТ и МРТ. Позитронно-эмиссионная томография — метод выявления распределения в структуре головного мозга различных химических веществ, принимающих участие в метаболической активности мозга, позволяет получать более точные сведения о nigrostriарной системе, что способствует ранней диагностике БП.

Автоматизированная система ранней и дифференциальной диагностики (АСД) основных симптомов БП является первым модулем разрабатываемого автоматизированного комплекса ранней и дифференциальной диагностики и управления лечением экстрапирамидной патологии. Создаваемый комплекс предназначен для помощи врачу в сложных случаях постановки диагноза, особенно на ранних стадиях заболевания, в индивидуальном подборе разных форм лечения и оценки его эффективности.

1. ОПИСАНИЕ БОЛЕЗНИ ПАРКИНСОНА

Болезнь Паркинсона — хроническое прогрессирующее заболевание центральной нервной системы, клинически проявляющееся нарушением произвольных движений. Клиника данного заболевания складывается из так называемой триады двигательных нарушений: тремора, мышечной ригидности и брадикинезии. В чистом виде один из симптомов встречается крайне редко, обычно у больных проявляется смешанная симптоматика. Поэтому в клинике, в зависимости от преобладания той или иной симптоматики, диагностируются различные формы заболевания (дрожательно-ригидная, ригидно-дрожательная, ригидно-акинетическая и др.).

Для дрожательной формы характерно наличие постоянного, сильного тремора при незначительном повышении мышечного тонуса и нерезкой общей скованности. Ригидная форма отличается резким повышением

тонуса мышц конечностей. Акинетическая форма нарушения моторики характеризуется резким замедлением темпа активных движений.

2. БАЗОВЫЕ ОСНОВЫ АСД

В основе разрабатываемой АСД лежит метод спектрально-статистической обработки интегральной электрической активности мышц — обработки электромиограммы (ЭМГ) [9]. Основу метода составляет выделение из сигнала ЭМГ частотной компоненты, создающей двигательную активность человека. Спектральный анализ этой составляющей ЭМГ позволяет получить частотные и амплитудные значения параметров, характеризующие тремор человека. Большой объем проведенных экспериментальных исследований позволил выделить статистически достоверные диапазоны значений определенных спектральных параметров для разных групп больных с экстрапирамидными нарушениями и, в частности, различных форм и стадий БП [10—13]. В процессе обследования сигналы ЭМГ с четырех мышц больного поступают через АЦП в компьютер, где выявляется низкочастотная составляющая сигналов путем детектирования и фильтрации. Далее проводится спектральный анализ полученных сигналов. Для каждой исследуемой мышцы накапливаются массивы, состоящие из 24-х спектров мощности одноминутных реализаций ЭМГ, и по ним строятся средние спектры, определяющие характерные особенности мышцы, т. е. ее «портрет» (рис. 1).

На рис. 1 отмечены параметры, используемые в качестве диагностических критериев: F_{pik} и A_{pik}^2 — частота и высота пика; A_{dop}^2 — средняя мощность частот спектра за исключением нулевой и пиковой частот. На спектре обозначены три частотных диапазона (P_1 , P_2 и P_3), в которых, в зависимости от формы БП, выделяются основные пики.

Анализ данных, полученных в экспериментальных исследованиях, позволил получить основные информа-

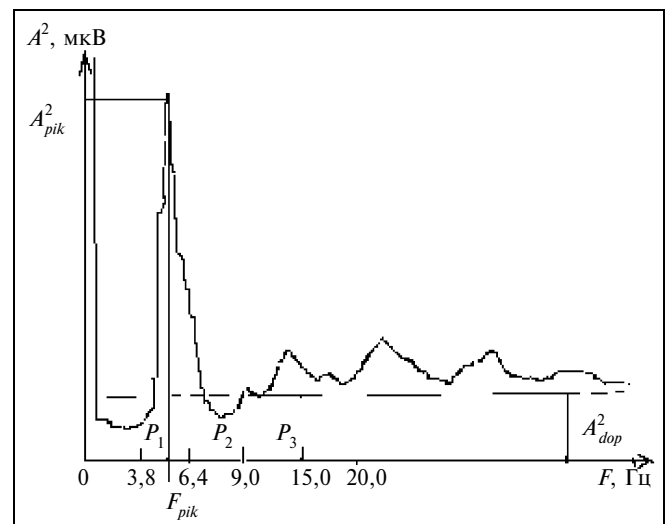


Рис. 1. «Спектральный портрет» мышцы лучезапястного сустава больного дрожательно-ригидной формой БП

ционные параметры спектров, которые использованы в АСД в качестве диагностических критериев:

— частота пика F_{pik} , т. е. значение частоты максимальной точки спектра, эта частота определяет основную частоту тремора;

— мощность пика A_{pik}^2 , т. е. высота максимальной точки спектра, этот параметр характеризует амплитуду тремора;

— высота нулевой точки спектра A_0^2 , определяющая средний уровень напряжения мышцы.

Для постановки диагноза, кроме основных спектральных параметров, необходим расчет дополнительных параметров. На основе набора значений основных и дополнительных параметров проводится диагностика заболеваний.

Дополнительный (расчетный) параметр — «коэффициент тремора»: $R = A_{pik}^2 / A_{dop}^2$; $A_{dop}^2 = \frac{\sum_{n=1}^n A_n^2 - A_{pik}^2 - A_0^2}{n-2}$; n — число точек спектра ($n = 51$).

Значение этого коэффициента определяет превалирование тремора над остальными составляющими сигнала. Кроме того, строятся полигоны распределений частот пика F_{pik} , на которых определяются: максимальное значение F_{mod} — указывающее на основную частоту тремора; доля попадания S доминирующей в спектре частоты (F_{pik}) в один из трех частотных диапазонов спектра $P1(3,8 - 6,4 \text{ Гц})$, $P2(6,4 - 9,0 \text{ Гц})$, $P3(9,0 - 15 \text{ Гц})$.

3. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СТРУКТУРА АСД

Структура АСД предусматривает режимы обработки данных о пациенте, постановку диагноза и ведения каталога больных. При создании АСД учитывались два аспекта. Прежде всего, система должна служить базой данных (БД) для хранения информации о пациентах, прошедших обследование, соответственно на этом этапе разработки применялся стандартный подход к проектированию БД. Далее в систему должен быть заложен алгоритм постановки диагноза неврологических заболеваний, основанный на обработке сигналов ЭМГ пациента.

Для конструирования БД использовалась реляционная модель, в которой логическая структура базы не зависит от ее физической структуры и способа хранения. Конструирование баз данных на основе реляционной модели имеет ряд важных преимуществ перед другими моделями:

- независимость логической структуры от физического и пользовательского представления;
- гибкость структуры базы данных — конструктивные решения не ограничивают возможности выполнять в будущем самые разнообразные запросы.

Так как реляционная модель не требует описания всех возможных связей между данными, можно впоследствии задавать запросы о любых логических взаимосвязях, содержащихся в базе, а не только о тех, которые планировались первоначально.

Для реализации структуры базы данных используются таблицы, созданные Database Desktop для хранения:

- определяющих данных о пациенте;
 - медицинских данных о пациенте;
 - характеристик обследования.
- В АСД предусмотрены:
- добавление, изменение и удаление записи о пациентах;
 - обработка файлов для установления диагноза больного и получения параметров;
 - классификация пациентов в зависимости от заболевания;
 - просмотр данных о конкретном обследовании;
 - графическое сопоставление параметров обследования;
 - поиск пациента по фамилии;
 - распечатка данных о конкретном обследовании.

4. АЛГОРИТМ РАБОТЫ АСД

Получаемые в ходе экспериментальных исследований матрицы основных параметров сохраняются в специально отведенном файле, который считывается программой при внесении результатов нового обследования. Для корректного считывания и дальнейшей обработки данных из файла был создан алгоритм считывания нетипизированных файлов. Для получения диагностических признаков созданы специальные про-

Диагностические признаки, используемые в АСД болезни Паркинсона

F_{mod}	3...6,3	6,3...12	9...20	3...10		6,3...12		Не более 6	Не менее 10	Не более 6	Не менее 6
S_1	Не менее 0,6	—		Не менее 0,45	Не менее 0,2	—		Не менее 0,45	Не менее 0,2	Не менее 0,3	
S_2	—	Не менее 0,6	—	Не менее 0,2	Не менее 0,45		Не менее 0,2	—			
S_3	—		Не менее 0,6	—		Не менее 0,2	Не менее 0,45	Не менее 0,2	Не менее 0,45	—	
A_{pik}^2	—		Не более 15	Не менее 15	—		6,3...10		—	Не менее 7	
R	Не менее 8	5...30	Не более 6	Не менее 8	5...30	5...10	3...10	Не более 10	Не более 8		Не более 5
DS	T	R	A	TR	RT	RA	AR	TA	AT	TNF	RNF

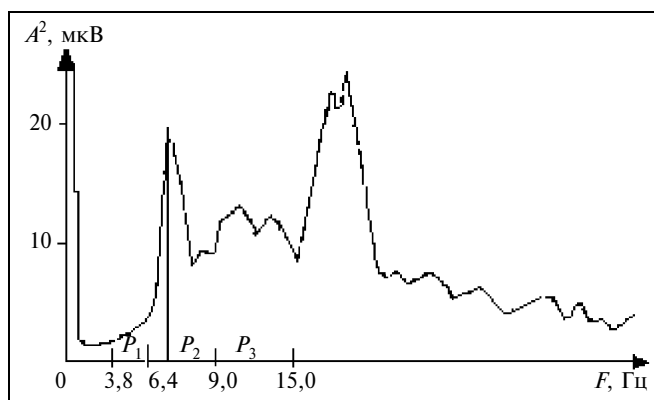


Рис. 2. Спектр ЭМГ больного с начальной стадией БП

цедуры, которые производят расчет дополнительных параметров и статистическую обработку данных.

Для диагноза БП предусмотрена возможность автоматической диагностики основных симптомов заболевания для каждой исследуемой мышцы — тремора (T), ригидности (R) и акинезии (A). Таким образом, диагноз больного представляется как комбинация букв. Разные симптомы могут иметь одинаковую степень выраженности, один из симптомов может значительно преобладать, на каком-то суставе те или иные симптомы могут отсутствовать. Система для каждой мышцы больного выдает одну или две буквы из набора T, R, A в зависимости от выраженности того или другого симптома. Если один из симптомов сильно преобладает, выдается одна буква, обозначающая этот симптом. Если у больного одинаково выражены два симптома, выдается набор из двух букв. Как правило, в таком случае один из двух симптомов несколько преобладает, тогда соответствующая ему буква ставится на первое место. Кроме этого, система дает информацию о начальных проявлениях тремора и ригидности. Когда клинически тремор не диагностируется, т. е. амплитуда патологического тремора настолько мала, что визуально он не заметен и врач его не диагностирует, то система, используя частотные характеристики, выдает информацию о наличии симптома даже в этих случаях. В качестве примера на рис. 2 показан спектр ЭМГ мышцы больного с доклиническим проявлением ригидно-дрожательной формы БП.

Как видно на спектре выявляется пик в области P_2 . Амплитуда этого пика меньше амплитуды физиологического пика, следовательно, патологический тремор визуально не выявляется. Клинический диагноз на этой стадии заболевания затруднен.

Система диагностирует основную симптоматику на основе диагностических признаков, приведенных в таблице. Корректность использованных для диагностики интервальных значений параметров была проверена специальными математическими моделями [14].

В строке DS приведены буквенные обозначения симптоматики, выдаваемой системой. Кроме клинической симптоматики тремора (T), ригидности (R) и акинезии (A) и их сочетаний, система дает информацию о доклинических проявлениях ригидности (RNF) и тремора (TNF). Если по данным, полученным при исследо-

вании больного, система не может определить преобладающий синдром, то она ставит знак «?».

Программа использует 22 формы для работы с таблицами базы данных и постановки диагноза и 4 вспомогательные формы для сервиса работы программ (печать данных, меню справки и т. п.).

Структура главного меню определяет характер работы программы и состоит из пяти основных пунктов: *Файл*, *Новое обследование*, *Редактировать*, *Удалить* и *Помощь*. В виде закладок отображены поля БД, каждое поле содержит ФИО пациентов, год рождения и дату обследования. Для просмотра данных обследования пациентов на соответствующей вкладке предусматривается кнопка *Подробнее*. Для больных с диагнозом БП кнопка меню *Подробнее* в окне БД программы позволяет дифференцировать пациентов по основной симптоматике заболевания: ригидность, тремор, акинезия, начальная форма. В главном окне также реализован поиск по фамилии пациента, находящегося во вкладке, обозначающей диагноз и активной в данный момент.

В окне ввода нового обследования заполняются поля: ФИО, врачебный диагноз, дата обследования, год начала заболевания, дата рождения, пол и лечащий врач. Причем работа программы осуществляется при заполнении обязательных полей — это ФИО больного и врачебный диагноз. Остальные поля вспомогательные. Для визуализации в графические поля окна вводятся картинки усредненных спектров сигналов для всех обследуемых мышц. На рис. 3 представлено окно ввода данных пациента.

Кнопка *Диагноз* открывает диалоговое окно, в котором необходимо выбрать файл, содержащий данные, полученные при обследовании пациента. В диагностическом окне (рис. 4) выводятся средние значения и дисперсии основных диагностических параметров спектров, полученные для каждой исследуемой мышцы. В этом окне представлен также результат автоматизиро-

Рис. 3. Окно ввода данных пациента

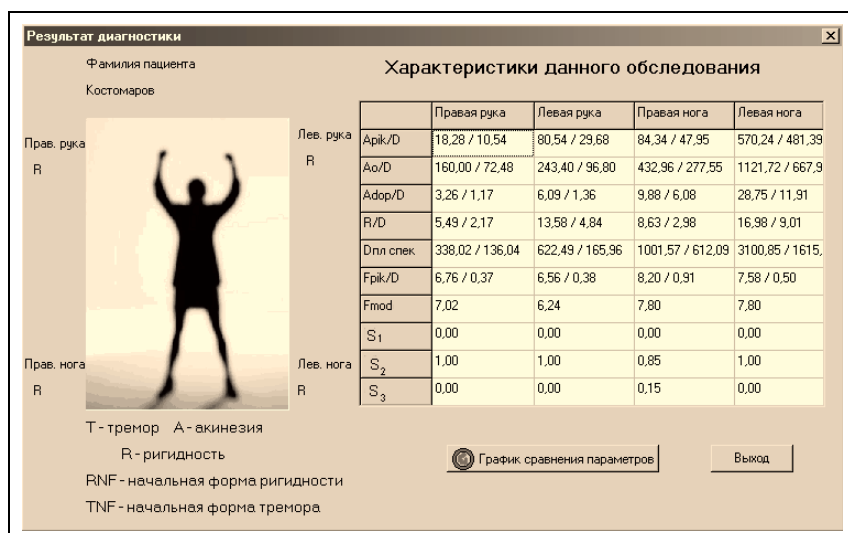


Рис. 4. Окно диагностики

ванной диагностики, получаемый для каждой мышцы исследуемого сустава больного.

В окне представлены значения диагностических признаков, которые позволили диагностировать преобладание ригидной (*R*) симптоматики для каждой исследуемой мышцы больного.

В АСД в зависимости от преобладания симптома больные дифференцируются по формам заболевания. Основные данные больного заносятся в соответствующие вкладки, которые определяют преобладающий симптом. Если у больного отмечаются два симптома с одинаковым действием, то данные больного попадают в две соответствующие вкладки. Например, больной, у которого тремор и ригидность одинаково выражены, будет отнесен во вкладку ригидность и во вкладку тремор. Для больных с начальными формами проявления заболевания предусмотрена вкладка *Начальная форма*.

На вкладках предусматривается кнопка *Подробнее*, позволяющая просматривать численные значения ста-



Рис. 5. Диаграмма сравнения значений диагностического признака F_{pic} , полученного при трех обследованиях больного в ходе проведения лечения

статических параметров, полученных для выделенного пациента. Здесь же по кнопке *Поиск* дается возможность введения одного или нескольких условий поиска. Поиск может проводиться по одному или нескольким критериям, например, по ФИО и году рождения. После выполнения запроса появляется окно, в котором представлен список обследования выделенного пациента.

Окно вывода информации по запросу позволяет получить сведения о числе обследований конкретного пациента, сравнить изменения параметров в динамике развития заболевания или в процессе лечения больного. Для этого предусмотрен вывод параметров в графической форме. Пользователь в меню выбора отмечает интересующий его пункт («все» или «выделенные записи») и по кнопке *Выполнить* входит в окно меню параметров. В данном окне он может выбрать один или несколько параметров для сравнения. По кнопке *Построить* пользователь получает возможность получить графическое представление значения выбранного параметра, отмеченного в найденных обследованиях пациента. Пример диаграммы для параметра F_{pic} показан на рис. 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задача получения объективных количественных оценок двигательной патологии при неврологических заболеваниях крайне актуальна и нова. Нам неизвестны такие системы, которые можно применять для диагностики экстрапирамидных нарушений в неврологии, так как, с одной стороны, до сих пор недостаточно знаний этиологии, патогенеза этих заболеваний, а с другой — многообразие клинических проявлений поражений экстрапирамидной системы из-за сложной архитектоники и особенностей функционального взаимодействия ее структур затрудняют постановку точного диагноза в клинике. Анализ зарубежных и отечественных информационных источников показывает, что в настоящее время основными диагностическими методами в клиниках являются различные клинические тесты, использующие балльную классификацию клинической симптоматики, основанную на субъективных оценках врача о наличии и выраженности симптома заболевания. Визуальные методы компьютерной, магнитно-резонансной и позитронно-эмиссионной томографии объективно выявляют нарушения сосудистой системы или структур головного мозга, приводящие к той или иной клинической симптоматике, но пока не нашли широкого применения.

Возможность объективной количественной классификации нарушений, особенно таких симптомов, как ригидность (повышение мышечного тонуса) и различного типа кинезии (гипокинезия — снижение инициативы к осуществлению движений, брадикинезия — замедленность движений, олигокинезия — бедность движения), нигде в мире не рассматривается. Возможность выявления ранних, доклинических признаков треморной и ригидной симптоматики по частотным характе-



ристикам двигательной активности мышц также является особенностью созданной методики.

Разрабатываемая АСД является одной из первых попыток дать возможность невропатологу количественно охарактеризовать трудно формализуемые симптомы и помочь не только в диагностике, но и в управлении лечением больного. Система позволяет выявить ранние, доклинические признаки заболевания, дать дифференциальную диагностику основных симптомов БП для каждой мышцы исследуемых суставов и выявить преобладающую симптоматику из рассматриваемой триады симптомов. Это позволяет врачу более объективно подбирать индивидуальные схемы лечения. Дальнейшее развитие АСД направлено на охват других заболеваний, связанных с поражением экстрапирамидной системы и имеющих схожую симптоматику. Основная цель этих разработок — помочь врачу в дифференциальной диагностике схожих по симптоматике заболеваний и подобрать адекватного лечения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гаспарян С. А.* Классификация медицинских информационных систем // Информационные технологии в здравоохранении. — 2001. — № 4—5. — С. 10—12.
2. *Ковалев Д. В.* Современные технологии создания медицинских информационных систем // Материалы V Междунар. симпозиума «Электроника в медицине. Мониторинг, диагностика, терапия» в рамках VII Междунар. славянского конгресса по электростимуляции и клинической электрофизиологии сердца. — СПб., 2006. — С. 202.
3. *Шток В. Н., Федорова Н. В.* Лечение паркинсонизма. — М.: 1997. — 194 с.
4. *Левин О. С.* Тремор // Российский медицинский журнал. — 2001. — № 6. — С. 23—27.
5. *Шток В. Н., Левин О. С., Федорова Н. В.* Экстрапирамидные расстройства. — М.: МИА, 2002. — 175 с.
6. *Гусев Е. И., Тухт А. Б.* Болезнь Паркинсона. Основные направления лечения // Consilium medicum. — 2000. — Т. 2. — № 2. — С. 67—72.
7. *Olanow C.* Magnetic resonance imaging in parkinsonism // Neurol. Clin. — 1992. — Vol. 10. — P. 405—420.
8. *Leliuk V., Polishuk V., Leiiuk S.* Diagnostic possibilities of duplex scanning for the evaluation of patients with Parkinson's disease // Cerebrovascular Disease. — 1999. — N 9. (Sup 2) — P. 22.
9. *Андреева Е. А., Хуторская О. Е.* Спектральный метод анализа электромиографической активности мышц. — М.: Наука, 1987. — 192 с.
10. *Khutorskaya O. Ye. and Fjodorova N. V.* Application of the Method of Spectral-Statistical Analysis EMG for Evaluating the Influence of Medication on the Treatment of Parkinson's Disease // Electromyography and Clinical Neurophysiology. — 1996. — Vol. 36, N 5. — P. 265—271.
11. *Andreeva Ye. A. and Khutorskaya O. Ye.* Application EMGs Spectral Analysis Method for the Objective Diagnosis of Different Clinical Forms of Parkinson's Disease // Electromyography and Clinical Neurophysiology. — 1996. — Vol. 36, N 3. — P. 187—192.
12. *Хуторская О. Е.* Индивидуальный подбор фармакотерапии при паркинсонизме с помощью компьютерной диагностики // Невропатология и психиатрия им. С. С. Корсакова. — 1998. — № 12. — С. 5—28.
13. *Богданов Р. Р., Турбина Л. Г., Хуторская О. Е.* Применение методики компьютерной СЭМГ для диагностики и контроля эффективности лечения начальных проявлений болезни Паркинсона // Альманах клинической медицины. Тем. вып.: Современные технологии диагностики и лечения в неврологии. — М.: МОНКИ, 2005. — Т. 3. — С. 124—129.
14. *Гусев Л. А., Хуторская О. Е.* Об одной оценке эффективности машинной диагностики двигательных нарушений // Автоматика и телемеханика. — 2003. — № 12. — С. 112—121.

☎ (495) 334-88-69;

e-mail: khutors@ipu.ru

Статья представлена к публикации членом редколлегии В. Н. Новосельцевым. □

Новая книга

Зенькова Л. П. Циклы: теоретическое наследие и реалии трансформационной экономики Беларуси. — М.: Интеграция, 2006. - 304 с.

Даны критический анализ и обобщение зарубежных и отечественных теорий экономических циклов и методик их исследования. Обработка значительного объема статистического материала по Беларуси позволила эмпирически выделить специфические черты циклообразования в трансформационной экономике, а затем теоретически обосновать институциональную модель цикла. На основе институциональной модели цикла предлагается методика кратко- и среднесрочного прогноза макроэкономики в Беларуси.

Структура монографии предполагает доступность изложения для аспирантов, преподавателей вузов, экономистов-теоретиков, содержит обширный статистический материал, обработанный с применением современных экономико-математических методов.

Внимание!

Наш новый электронный адрес pu@ipu.ru, тел./факс (495) 334-92-00.

Редакция

ИНЕРЦИАЛЬНО-СПУТНИКОВАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМИ СРЕДСТВАМИ

В. Г. Макаренко⁽¹⁾, А. А. Подорожняк⁽¹⁾, С. В. Рудаков⁽¹⁾, А. В. Богомолов⁽²⁾

⁽¹⁾ Харьковский университет Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба, г. Харьков;

⁽²⁾ Государственный научно-исследовательский испытательный институт военной медицины, г. Москва

Теоретически обоснована и подтверждена результатами имитационного моделирования целесообразность применения инерциально-спутниковой навигационной системы для управления транспортными средствами, использующей наряду с сигналами глобальной космической навигационной системы бесплатформенную инерциальную систему переменной размерности, реализующую метод инвариантного контроля виртуально стабилизированных инерциальных платформ.

ВВЕДЕНИЕ

Управление работой транспортных средств при перевозке грузов осуществляется диспетчерской службой. А для обеспечения должного качества оперативного управления перспективно внедрение автоматизированных систем контроля, учета и управления подвижным составом. Создание таких систем необходимо начинать с разработки бортовых приборов управления и контроля. Наличие оперативной информации о показателях транспортных работ позволит улучшить качество управления и, в конечном итоге, повысить эффективность транспортной системы.

Системы диспетчеризации, мониторинга и контроля ТС (AVL — Automatic Vehicle Location, Fleet-management) позволяют диспетчерским службам:

- наблюдать перемещение всех ТС по всей маршрутной сети в режиме реального времени;
- автономно контролировать соблюдение расписаний и графиков движения;
- в реальном времени получать информацию об автоматически выявленных нарушениях заданных режимов движения объектов (сход с маршрута или отклонение от него, большое опоздание, выбытие из движения и т. п.);
- оперативно реагировать на экстренные сообщения водителей (аналог «тревожной кнопки») и принимать необходимые меры (вызвать милицию, скорую меди-

цинскую помощь, пожарную команду, ремонтную службу и др.);

— создавать и обрабатывать отчеты по эксплуатации (пройденный километраж, средний расход топлива) ТС за заданный промежуток времени и др.

Они также позволяют:

- повысить эффективность диспетчерских служб;
- снизить затраты на транспортное обслуживание;
- повысить безопасность перевозок;
- исключить использование ТС не по назначению или вне графика;
- качественно улучшить систему информационного сопровождения грузоперевозок;
- улучшить качество транспортного обслуживания клиентов.

В общем случае система диспетчеризации, мониторинга и контроля ТС функционирует следующим образом: на ТС устанавливается бортовой комплект, состоящий из модулей GPS и GSM, бесплатформенной инерциальной навигационной системы, энергонезависимой памяти, контроллера цепей, датчиков и исполнительных устройств, с помощью которых определяются текущие координаты, скорость, курс, а также собирается информация о состоянии ТС и степени отработки заданных команд. Пример размещения аппаратуры спутниковой навигации Mitac MIO 168 с программным обеспечением PocketGPS Pro в салоне автомобиля представлен на рис. 1. В транспортном средстве БИНС устанавливается на горизонтальную поверхность таким образом, чтобы



Рис. 1. Размещение аппаратуры спутниковой навигации в салоне автомобиля

крышка блока чувствительных элементов располагалась сверху, а информационный разъем был направлен в сторону, противоположную направлению движения ТС. Подключение инерциальных навигационных датчиков обеспечивает возможность реализации алгоритмов счисления пути (dead reckoning) даже при отсутствии GPS-сигнала.

Комбинированные бортовые цифровые навигаторы помимо вычисления координат текущего местоположения ТС позволяют использовать карту дорог для внесения поправок при определении координат по данным спутниковой навигации, прокладывать оптимальные маршруты движения (AutoRouting), учитывая при этом направление движения на разных улицах и развязках, дорожные знаки и разметку, хранить в памяти узловые точки маршрутов (Points of Interest) и траекторию, пройденную пользователем (Tracks). Кроме того, при расчете траектории может приниматься во внимание статистика загруженности дорог в зависимости от времени суток и информация о дорожных пробках, передаваемая по радиоканалам соответствующими службами. При движении ТС по маршруту цифровой навигатор обеспечивает водителя голосовыми и визуальными подсказками. В случае отклонения от маршрута навигатор прокладывает его заново, восстанавливая ориентировку.

Обеспечение возможности реализации автоматических ТС, движущихся по управляемым траекториям, семейству траекторий различного типа, традиционно требует универсализации систем управления, которые обеспечат требуемые значения множеству показателей эффективности выполнения каждой целевой задачи. Качество и эффективность решения каждой целевой за-

дачи связаны с реализацией некоторой наиболее целесообразной в заданных условиях стратегии. Эта стратегия для ТС, движущихся по управляемым траекториям, реализуется с заданной точностью и надежностью благодаря применению навигационной системы переменной размерности.

Принятые сокращения:

АСН — аппаратура спутниковой навигации;
 БИНС — бесплатформенная инерциальная навигационная система;
 ВИП — виртуальная инерциальная система;
 ИНС — инерциальная навигационная система;
 НКА — навигационный космический аппарат;
 СРНС — спутниковая радионавигационная система;
 ТС — транспортное средство.

В работах, посвященных затронутым вопросам, основное внимание уделяется отдельным составляющим комплексирования навигационной системы ТС [1, 2] либо описывается решение такой задачи для комплексной навигационной системы, использующей как одну из составляющих инерциальную подсистему на гиростабилизированной платформе [1, 3], что часто неприемлемо по стоимостным показателям.

Нами предлагается подход к созданию универсальной комплексной навигационной системы ТС, позволяющий обеспечить заданную точность решения навигационной задачи с использованием сигналов спутниковой радионавигационной системы и бесплатформенной инерциальной системы ТС. При этом в качестве инерциальной подсистемы предлагается комплексное использование существующих в ТС измерительных элементов системы навигационных определений, размерность которой изменяется в зависимости от реализуемой и требуемой точностей для каждой целевой задачи. По избыточным измерениям БИНС и антенной системы аппаратуры спутниковой навигации формируется конечное множество виртуальных инерциальных платформ, в которых формируются сигналы траекторного управления, а затем производится селекция ВИП, для которых наблюдается минимум значения инварианта, характеризующего реализованные условия прогнозируемой степени выполнения целевой задачи ТС. Применение БИНС переменной размерности позволяет исключить из рассмотрения наихудшие из измерительных каналов для решения конкретной целевой задачи в режиме реального времени.

1. СОСТАВ КОМПЛЕКСНОЙ ИНЕРЦИАЛЬНО-СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

В целях универсализации системы управления ТС рассмотрим комплексную инерциально-спутниковую навигационную систему (рис. 2), в состав которой входят отдельно и непрерывно функционирующие автономная БИНС; АСН, работающая по сигналам СРНС; бортовой эталон времени и частоты БЭВЧ; устройство синхронизации УСн; соответствующие входные преобразователи Вх Пр и многоканальное многопроцессорное вычислительное устройство (МПВУ), реализованное на микропроцессорах (МП).

Основу БИНС составляет блок чувствительных элементов и цифровой обработки сигналов *БЧЭ*, информация от которого может обрабатываться совместно с показаниями спидометра, датчика пройденного пути, дальномеров *ДМ* и аппаратуры спутниковой навигации. Блок чувствительных элементов определяет параметры углового и линейного положения объекта. В состав блока микроэлектромеханических датчиков движения мо-

гут входить три гироскопа, которые выступают в качестве измерителей угловых скоростей; четыре акселерометра для измерения линейных параметров движения (ЛПД), трехканальный магнитометр, бароальтиметр, несколько температурных датчиков. Данные с измерителей проходят этапы первичной (ПОИ) и вторичной обработки информации (ВОИ). Управляющие сигналы, производимые аппаратурой управления (АУ) предлагае-

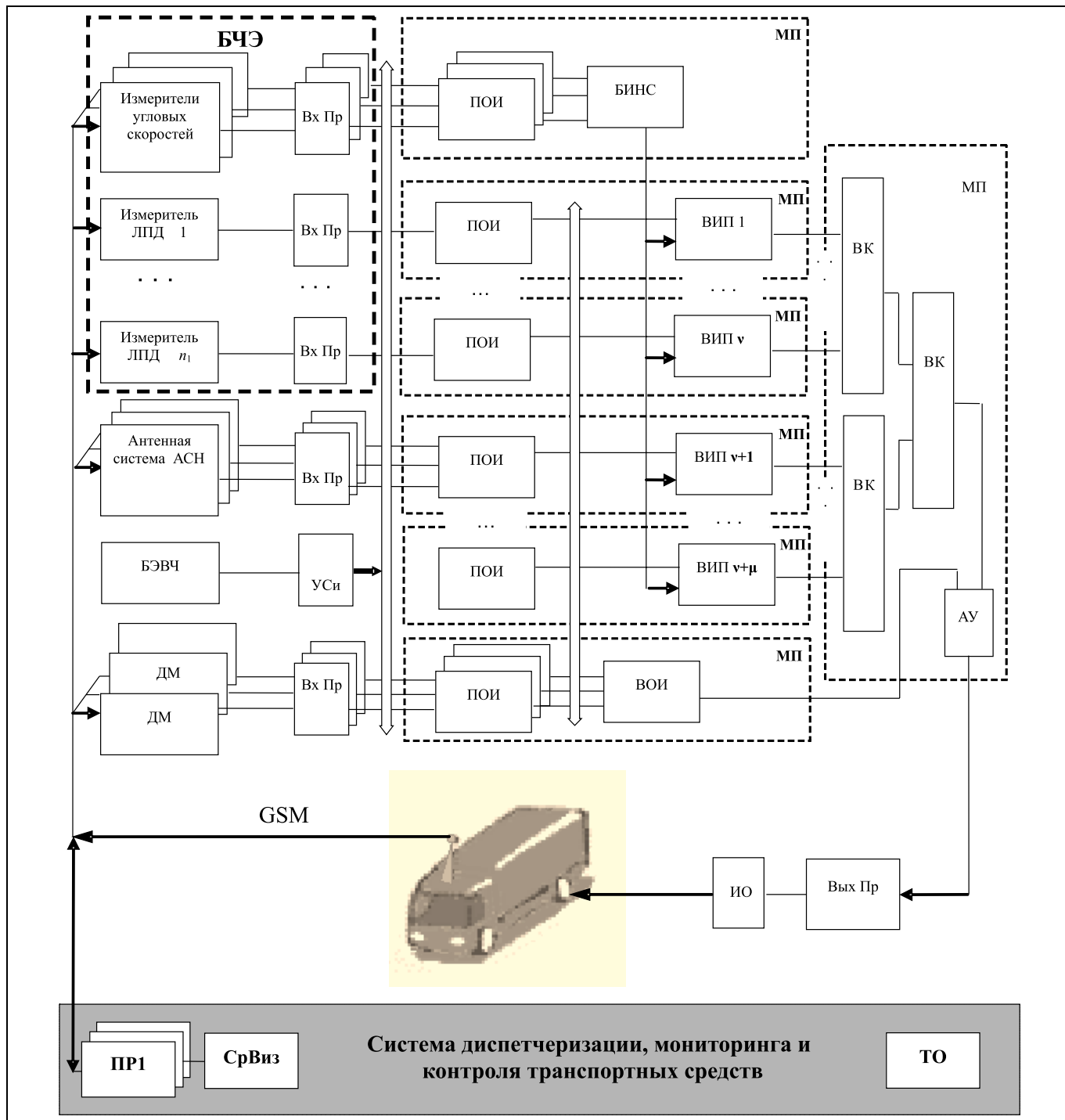


Рис. 2. Структурная схема инерциально-спутниковой навигационной системы для управления транспортным средством



мой системы, поступают через выходные преобразователи (Вых Пр) на исполнительные органы (ИО) транспортного средства.

Выходные данные инерциально-спутниковой навигационной системы по каналу сотовой связи GSM передаются в диспетчерский центр. В диспетчерском центре данные принимаются с помощью приемников Пр 1 и осуществляется визуальный контроль местонахождения ТС на электронной карте местности с помощью средств визуализации СрВиз, отображаются их состояние (по информации датчиков) и генерируются необходимые команды для управления. Накапливаемая информация базы данных используется для анализа и генерации необходимых отчетов (например, о пройденном пути, количестве израсходованного топлива, состоянии груза или о выполненных задачах). Обеспечивает работу диспетчерского центра технологическое оборудование ТО.

2. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ВИРТУАЛЬНЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ПЛАТФОРМ

На основе избыточных измерений в многоканальном микропроцессорном вычислительном устройстве математически моделируется конечное множество инерциальных декартовых систем отсчета, в которых формируются сигналы траекторного управления, т. е. формируется конечное множество ВИП Q , описываемое обобщенными координатами:

$$Q = \{(q_{ij} | q_{ij}(t) \in \Omega_{q_{ij}}, t_0 \leq t \leq t_k, \\ i = \overline{1, 6}, j = \overline{1, (v + \mu)}\},$$

где i — номер обобщенной координаты; j — номер ВИП; t_0 и t_k — время начала и окончания движения ТС; v — число ВИП, формируемых на основе сигналов БИНС; μ — число ВИП, формируемых на основе сигналов СРНС.

Каждая ВИП образуется либо на основе измерений акселерометров (минимально необходимы три акселерометра и три измерителя угловой скорости), либо по сигналам навигационных космических аппаратов — минимально необходимо четыре навигационных космических аппарата.

Для согласования названных частных систем координат в единой ортогональной инерциальной системе координат WGS-84 обобщенным координатам $q_{ij}(t)$ присваиваются соответствующие значения реализации действительных координат $x_j(t)$, $y_j(t)$, $z_j(t)$ и скоростей $\dot{x}_j(t)$, $\dot{y}_j(t)$, $\dot{z}_j(t)$ в j -й ВИП.

На каждом такте вычислений на участке движения из множества ВИП с порядковыми номерами $j = \overline{1, v}$ алгоритм выбора канала (ВК) [4] производит селекцию одной ВИП, для которой наблюдается минимум значения инварианта

$$I_{su} : I_{su} = \min_{1 \leq s \leq v} I_s.$$

Выбор одного минимального набора инерциальных измерителей ЛПД, обеспечивающих минимум значения инварианта I_{su} , позволяет исключить избыточные инер-

циальные измерители и соответствующие им ВИП. На основе выбранной ВИП вычисляется значение штрафной функции r_{nu} выполнения целевой задачи ТС.

Из ВИП с порядковыми номерами $j = \overline{v+1, v+\mu}$ алгоритм выбора каналов производит отбор одной, обеспечивающей минимум значения инварианта I_{sc} . Выбор одного минимального набора НКА, обеспечивающего минимум I_{sc} , позволяет исключить избыточные НКА и соответствующие им ВИП.

3. ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В БОРТОВОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

Технические устройства транспортных средств, выполняющие инерциальные навигационные измерения, как правило, обладают недостаточной точностью, и их ошибки накапливаются с течением времени. Реализуемые значения показателей эффективности решения навигационной задачи для спутниковой подсистемы ограничены многолучевостью распространения радионавигационных сигналов, ограниченной радиовидимостью и зависимостью от погодных условий.

Интеграция бортового оборудования в единую функционально, структурно и конструктивно взаимосвязанную комплексную навигационную систему позволяет полнее использовать имеющуюся на борту ТС избыточность информации, т. е. появляется возможность повышения точности, помехоустойчивости, непрерывности и надежности навигационных определений и, как следствие, расширения перечня решаемых задач (универсализация) и повышения качества их решения.

При создании и совершенствовании систем управления ТС, удовлетворяющих широкому спектру различных, часто противоречивых, требований [5, 6], возможны различные варианты построения и функционирования системы управления ТС.

Основу предлагаемого навигационного комплекса составляет БИНС как наиболее надежная информативная и автономная система. Выходом БИНС являются географические координаты, высота, проекции скорости относительно Земли и углы ориентации ТС. Упрощенная функциональная схема БИНС представлена на рис. 3.

Акселерометры в БИНС связаны непосредственно с корпусом ТС. Их задача — измерять вектор кажущегося ускорения $\mathbf{a} = \mathbf{w} - \mathbf{g}$. Задача построения инерциальной системы отсчета решается в быстродействующем многоканальном микропроцессорном устройстве по информации измерителей угловых скоростей и измерителей ЛПД.

В случае, когда блок измерителей угловой скорости выдает данные о проекциях $\omega_{x^c}^a(t)$, $\omega_{y^c}^a(t)$, $\omega_{z^c}^a(t)$ вектора $\omega^a(t)$ на оси x^c , y^c , z^c , которые жестко связаны с объектом, матрицу $\mathbf{V}(t)$ направляющих косинусов перехода от связанной к инерциальной системе можно найти с помощью формулы Пуассона [1] из соотношения

$$\dot{\mathbf{V}}(t) = -\mathbf{V}(t)\mathbf{\Pi}^T(t),$$

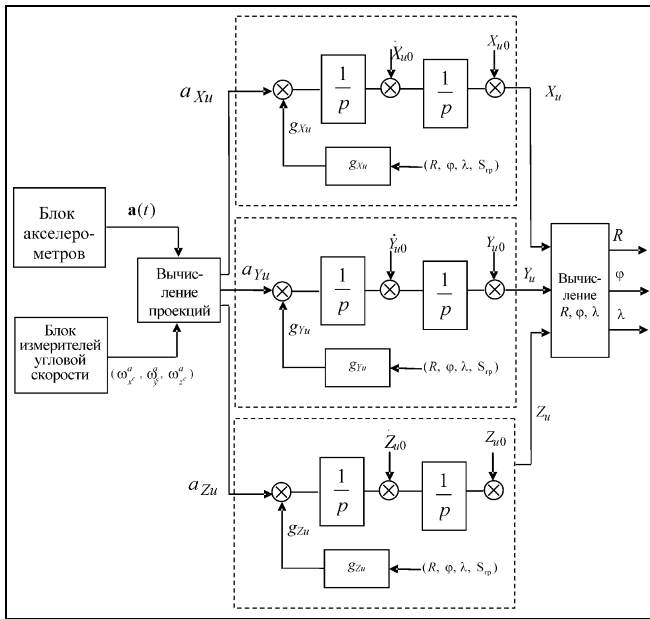


Рис. 3. Упрощенная функциональная схема бесплатформенной инерциальной навигационной системы транспортного средства

при начальных условиях $\mathbf{V}(t_0) = \mathbf{V}_0$, где матрицы $\mathbf{V}(t)$ и $\mathbf{\Pi}(t)$ соответственно имеют вид:

$$\mathbf{V}(t) = |\vartheta_{ij}| = \begin{vmatrix} C_\alpha C_\beta & S_\alpha S_\gamma + C_\alpha S_\beta C_\gamma & S_\alpha C_\gamma - C_\alpha S_\beta S_\gamma \\ S_\alpha C_\beta & -C_\alpha S_\gamma + S_\alpha S_\beta C_\gamma & -C_\alpha C_\gamma - S_\alpha S_\beta S_\gamma \\ -S_\beta & C_\beta C_\gamma & -C_\beta S_\gamma \end{vmatrix},$$

где для сокращения записи приняты обозначения C_α , C_β и C_γ для косинусов и S_α , S_β и S_γ для синусов соответствующих гироскопических углов ориентации (α , β , γ),

$$\mathbf{\Pi}(t) = \begin{vmatrix} 0 & -\omega_{z^c}^a(t) & \omega_{y^c}^a(t) \\ \omega_{z^c}^a(t) & 0 & -\omega_{x^c}^a(t) \\ -\omega_{y^c}^a(t) & \omega_{x^c}^a(t) & 0 \end{vmatrix}.$$

Таким образом, элементы матрицы $\mathbf{V}(t)$ направляющих косинусов перехода от связанной к инерциальной системе координат можно найти из решения девяти дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} \dot{\vartheta}_{11} &= \vartheta_{12} \omega_{z^c}^a - \vartheta_{13} \omega_{y^c}^a; & \dot{\vartheta}_{12} &= \vartheta_{13} \omega_{x^c}^a - \vartheta_{11} \omega_{z^c}^a; \\ \dot{\vartheta}_{13} &= \vartheta_{11} \omega_{y^c}^a - \vartheta_{12} \omega_{x^c}^a; \\ \dot{\vartheta}_{21} &= \vartheta_{22} \omega_{z^c}^a - \vartheta_{23} \omega_{y^c}^a; & \dot{\vartheta}_{22} &= \vartheta_{23} \omega_{x^c}^a - \vartheta_{21} \omega_{z^c}^a; \\ \dot{\vartheta}_{23} &= \vartheta_{21} \omega_{y^c}^a - \vartheta_{22} \omega_{x^c}^a; \\ \dot{\vartheta}_{31} &= \vartheta_{32} \omega_{z^c}^a - \vartheta_{33} \omega_{y^c}^a; & \dot{\vartheta}_{32} &= \vartheta_{33} \omega_{x^c}^a - \vartheta_{31} \omega_{z^c}^a; \\ \dot{\vartheta}_{33} &= \vartheta_{31} \omega_{y^c}^a - \vartheta_{32} \omega_{x^c}^a, \end{aligned}$$

а задание начальных условий для этой системы уравнений представляет собой выставку бесплатформенной инерциальной системы с измерителями угловой скорости.

Проекции кажущегося ускорения в инерциальной системе координат в первом приближении могут быть найдены по формуле

$$\begin{vmatrix} a_{Xu} \\ a_{Yu} \\ a_{Zu} \end{vmatrix} = \mathbf{V} \begin{vmatrix} a_{x^c} \\ a_{y^c} \\ a_{z^c} \end{vmatrix}.$$

Проекции ускорения ТС на оси инерциальной системы координат можно записать в виде соотношений

$$\begin{aligned} \ddot{X}_u &= a_{Xu}(t) + g_{Xu}; & \dot{X}_u(t_0) &= \dot{X}_{u0}; & X_u(t) &= X_{u0}; \\ \ddot{Y}_u &= a_{Yu}(t) + g_{Yu}; & \dot{Y}_u(t_0) &= \dot{Y}_{u0}; & Y_u(t) &= Y_{u0}; \\ \ddot{Z}_u &= a_{Zu}(t) + g_{Zu}; & \dot{Z}_u(t_0) &= \dot{Z}_{u0}; & Z_u(t) &= Z_{u0}, \end{aligned}$$

где X_u , Y_u и Z_u — координаты местоположения ТС относительно инерциальной системы координат $X_u Y_u Z_u$, g_{Xu} , g_{Yu} и g_{Zu} — проекции вектора \mathbf{g} интенсивности гравитационного поля на ее оси.

Декартовы координаты X_u , Y_u и Z_u связаны с геоцентрическими R , φ и λ следующими соотношениями [7]:

$$R = \sqrt{X_u^2 + Y_u^2 + Z_u^2};$$

$$\varphi = \arctg \frac{Z_u}{\sqrt{X_u^2 + Y_u^2}};$$

$$\lambda = \arctg \frac{Y_u}{X_u} [-\pi, \pi] - S_{\text{Гр}},$$

где $S_{\text{Гр}}$ — гринвичское звездное время (в радианах).

На основании известных координат R , φ , λ и X_u , Y_u , Z_u вычисляются проекции g_{Xu} , g_{Yu} , g_{Zu} вектора \mathbf{g} [1]:

$$g_{Xu} = (g_3 \cos \varphi - g_2 \sin \varphi) \cos(\lambda + S_{\text{Гр}});$$

$$g_{Yu} = (g_3 \cos \varphi - g_2 \sin \varphi) \sin(\lambda + S_{\text{Гр}});$$

$$g_{Zu} = g_3 \sin \varphi + g_2 \cos \varphi,$$

где $g_2 = 0,5 g_e^m (e^2 - q) (a/R)^4 \sin^2 \varphi$;

$$g_3 = -g_e^m (e^2 - q) (a/R)^2 [1 - 0,5e^2 + 1,5q + 0,5(e^2 - q)(1 - 3\sin^2 \varphi)(a/R)^2],$$

где, в свою очередь, g_e^m — ускорение свободного падения на экваторе $g_e^m = 9,780318 \text{ см/с}^2$; q — безразмерный коэффициент ($q = a\Omega^2/g_e^m = 0,00346775$); $e^2 = (a^2 - b^2)/a^2 \approx 0,00669438$ — квадрат эксцентриситета; $a = 6378245 \text{ м}$, $b = 63568663 \text{ м}$ — большая и малая полуоси эллипсоида Ф. Н. Красовского.



Погрешности вычислений вектора \mathbf{g} по приведенным выше формулам по отношению к идеальным вычислениям не превосходят $\pm 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^2 = \pm 2 \cdot 10^{-5} \text{ г}$ [1].

Если местоположение пункта назначения задано в геодезических координатах, то текущие значения геодезических координат ТС могут быть вычислены по алгоритму, приведенному в работе [3].

4. ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В АППАРАТУРЕ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ

В качестве основного корректора БИНС использует АСН. Вследствие относительной малости коэффициентов временной корреляции погрешностей АСН в измерении местоположения по сравнению с периодом Шулера ($T_{\text{ш}} = 84$ мин) погрешности шумов АСН принимаются «белым» шумом с заданной интенсивностью. В некоторых случаях (в частности, при наличии интенсивных помех, обусловленных влиянием отраженного сигнала) данное допущение требует дополнительного обоснования и исследования.

Один из возможных алгоритмов определения координат и скорости ТС по сигналам НКА имеет следующий вид [2].

Выражение для радиальной скорости \dot{s} :

$$\dot{s} = (\mathbf{R} - \mathbf{R}_i)^T (\mathbf{V}_i - \mathbf{V}) / s + \Delta \dot{s}, \quad (1)$$

где

$$s = \sqrt{(\mathbf{R}_i - \mathbf{R})^T (\mathbf{R}_i - \mathbf{R})} + \Delta s,$$

s — дальность ТС—НКА; \mathbf{R} и \mathbf{R}_i — радиус-векторы ТС и i -го НКА в абсолютной геоцентрической системе координат; \mathbf{V}_i — вектор абсолютной скорости i -го НКА; \mathbf{V} — искомый вектор абсолютной скорости ТС; $\Delta s = c\Delta t$ — погрешность определения дальности, вызванная смещением частоты Δt опорного генератора навигационного приемника ТС относительно бортового генератора НКА, общая для всех НКА; $\Delta \dot{s}$ — погрешность определения радиальной скорости ТС—НКА, вызванная дрейфом смещения синхронизации, общим для всех каналов; c — скорость распространения радиосигнала.

Параметры \mathbf{R}_i и \mathbf{V}_i наряду со служебной и другой вспомогательной информацией передаются в навигационном сообщении i -го НКА. Значение \mathbf{R} определяется на этапе обработки кодовых спутниковых измерений.

Соотношение (1) может быть представлено в виде

$$\dot{s} = V_{si} + V_s + \Delta \dot{s},$$

где $V_{si} = (\mathbf{R}_i - \mathbf{R})^T / s \mathbf{V}_i$, $V_s = (\mathbf{R}_i - \mathbf{R})^T / s \mathbf{V}$, \dot{s} — значение измерения доплеровского смещения частоты, представленное в виде суммы трех составляющих.

Первое слагаемое V_{si} вычисляется в явном виде по известной информации о параметрах движения НКА и координатах ТС, вторая составляющая V_s линейно зависит от абсолютной скорости объекта \mathbf{V} . Третья составляющая $\Delta \dot{s}$, для повышения точности, может быть оце-

нена в результате решения навигационной задачи. Следовательно, задача определения скорости ТС при помощи доплеровских измерений сводится к стандартной линейной задаче оценивания. Ее решение при постулировании соответствующих гипотез о шумах измерений имеет вид [2]:

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{X}_{k-1} + (\mathbf{H}_k^T \mathbf{W}_k^{-1} \mathbf{H}_k)^{-1} \mathbf{H}_k^T \mathbf{W}_k^{-1} \Delta \mathbf{Z}_k,$$

где $\mathbf{X}_k = |R_k, \Delta s_k, V_k, \Delta \dot{s}|^T$ — вектор состояния; \mathbf{H}_k — матрица частных производных измеряемых параметров по определяемым параметрам; \mathbf{W}_k — корреляционная матрица погрешностей измерений; $\Delta \mathbf{Z}_k = \mathbf{Z}_k - D_k$ — разность между измеренными значениями навигационных параметров \mathbf{Z}_k и вычисленными по известным данным D_k на k -м шаге.

Несмотря на значительный прогресс в области спутниковой навигации, точность спутниковых определений для использования в гражданских целях остается низкой, даже если технические возможности позволяют реализовать более высокие характеристики. В соответствии с требованиями законодательства на территории СНГ в большинстве образцов АСН точность выходных навигационных параметров с помощью специальных размазывающих коэффициентов преднамеренно снижается до 30 м. Это приводит к тому, что на цифровой карте положение ТС достаточно часто не совпадает с профилем дороги. Названное обстоятельство усугубляется и тем, что длина самого ТС может превышать 10 м.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПЛЕКСНОЙ ИНЕРЦИАЛЬНО-СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Точностные характеристики комплексированной навигационной системы исследовались на траекториях, близких к реальным. Работа БИНС и остальных подсистем моделировалась в соответствии с их алгоритмами функционирования.

Скорость дрейфа ω_B двухстепенного или одной из осей трехстепенного гироскопа описывается соотношением:

$$\begin{aligned} \omega_B = & C_0 + (C_1 + C_{1T}\Delta T)a_x + (C_2 + C_{2T}\Delta T)a_y + \\ & + (C_3 + C_{3T}\Delta T)a_z + C_{12}a_x a_y + C_{13}a_x a_z + C_{23}a_y a_z + \\ & + C_{41}B_x + C_{42}B_y + C_{43}B_z + \omega_e(t), \end{aligned} \quad (2)$$

где a_x , a_y и a_z — проекции кажущегося ускорения на оси координат x , y и z гироскопа; ΔT — отклонение температуры гироскопа от ее номинального значения; B_x , B_y и B_z — составляющие окружающего магнитного поля; $\omega_e(t)$ — дополнительный дрейф, обусловленный вибрациями.

Величина C_0 описывает систематический дрейф гироскопа, вызванный смещением центра масс гироскопа от центра его подвеса под действием момента инерционно-гравитационной силы.

Все указанные в соотношении (2) коэффициенты носят случайный характер. На множестве однотипных гироскопов их можно рассматривать как случайные ве-

личины с нормальным законом распределения и нулевым математическим ожиданием. Коэффициенты C_1 , C_2 и C_3 имеют размерность $^{\circ}/(\text{ч} \cdot \text{g})$.

Были приняты следующие предельные значения (3σ) коэффициентов:

$C_0 = 3\sigma = 0,1$ $^{\circ}/\text{ч}$ со стабильностью в течение нескольких недель $0,02$ $^{\circ}/\text{ч}$ (значение C_0 приведено с учетом компенсации постоянного момента в результате выставки системы на старте); $C_1 = C_2 = C_3 = 3\sigma = 0,5$ $^{\circ}/(\text{ч} \cdot \text{g})$ со стабильностью в течение того же срока не хуже $0,1$ $^{\circ}/(\text{ч} \cdot \text{g})$;

$$C_{1T} = C_{2T} = C_{3T} = 3\sigma_2 = 0,01$$
 $^{\circ}/\text{ч} \cdot \text{g} \cdot ^{\circ}\text{C}$;

$$C_{1T} = C_{13} = C_{14} = 3\sigma_3 = 0,1$$
 $^{\circ}/\text{ч} \cdot \text{g}^2$;

$$C_{41} = C_{42} = C_{43} = 3\sigma_4 = 100$$
 $^{\circ}/(\text{ч} \cdot \text{Tл})$.

Постоянная времени T_a современных акселерометров составляет $5 \cdot 10^{-5}$ с. Была принята следующая типовая модель погрешности акселерометра:

$$a_B = D + H + \Delta a_0 + k_1 a_1 + k_2 a_1^2 + k_3 a_1^3 + k_{12} a_2 + k_{13} a_3 + k_4 \Delta T, \quad (3)$$

где a_1 — составляющая кажущегося ускорения вдоль оси чувствительности; a_2 и a_3 — перекрестные составляющие; D — зона нечувствительности; H — гистерезис; Δa_0 — систематическая погрешность (смещение нуля акселерометра); k_1 — линейное отклонение масштабного коэффициента акселерометра; k_2, k_4, k_{12}, k_{14} — нелинейные коэффициенты; k_4 — коэффициент для небольших отклонений от номинальной температуры.

Параметры (3σ), характеризующие работу акселерометра, рассчитанного на измерение максимальных ускорений от 1 до 10 g, следующие: $D = 10^{-5}$ g; $H = 10^{-4}$ g; $\Delta a_0 = 3\sigma_{a0} = 5 \cdot 10^{-3}$ g; со стабильностью $2 \cdot 10^{-4}$ g; $k_1 = 3\sigma_{a1} = 0,1$ % = 10^{-3} по всей шкале; $k_2 = 3\sigma_{a2} = 10^{-4}$ g/g²; $k_3 = 3\sigma_{a3} = 2 \cdot 10^{-5}$ g/g³; $k_{12}, k_{13} = 0,05$ %; $k_4 = 3\sigma_{a4} = 10^{-5}$ g/ $^{\circ}\text{C}$.

Формулы (2) и (3) позволяют имитировать погрешности гироскопов и акселерометров, входящих в математические модели БИНС.

Результирующие оценки погрешностей измерений вычислялись с помощью весовых коэффициентов для сигналов от различных навигационных датчиков. На конечном этапе оптимальной фильтрации корректировалась выходная информация первичных датчиков и компенсировались составляющие погрешностей каждой из подсистем, входящих в навигационный комплекс [3, 8]. В качестве обобщенной характеристики точности навигационных определений использовалась величина σ_{Σ} , определяемая выражением $\sigma_{\Sigma} = \text{Sp}\Theta$, где Sp — след матрицы погрешностей измерений $\Theta = (H_k^T W_k^{-1} H_k)^{-1}$.

В качестве исходных данных были приняты следующие начальные значения скорости и ускорения ТС: $V_x = 17$ м/с, $a_x = 0$, $V_y = 1$ м/с, $a_y = 4$ м/с², $V_z = 0$, $a_z =$

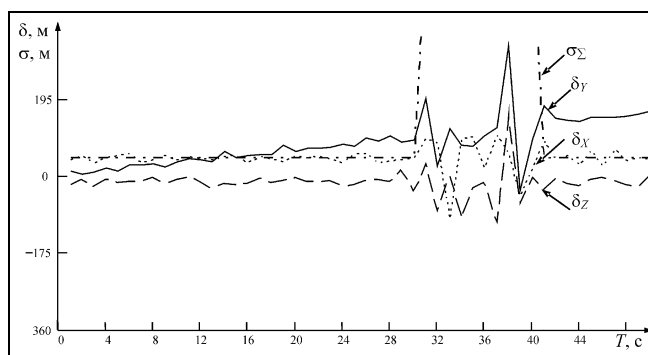


Рис. 4. Зависимости корректирующих приращений и обобщенной ошибки навигационных определений для АСН ТС от времени наблюдения

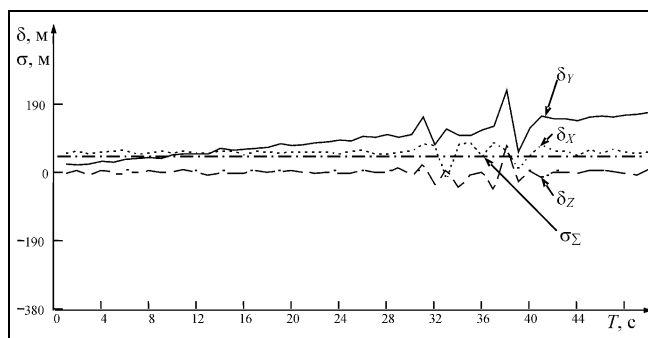


Рис. 5. Зависимости корректирующих приращений и обобщенной ошибки навигационных определений для комплексной навигационной системы от времени наблюдения

0; шумов измерений в штатном режиме работы АСН $\sigma_r = 25$ м/с, $\sigma_f = 0,2$ м/с.

Значения ошибок измеряемых величин для спутниковой подсистемы ТС в аномальном режиме в 10 раз превышают ошибки в штатном режиме. Результаты моделирования работы АСН представлены на рис. 4, а бесплатформенной комплексированной навигационной системы — на рис. 5.

Штатный режим работы моделировался на интервале 40 с ($T = 0 \dots 40$ с), влияние эффектов многолучевости, замирания, затенения на рис. 4 и 5 можно проследить на интервале аномальной работы АСН в 10 с ($T = 30 \dots 40$ с). Моделирование ИНС осуществлялось в соответствии с работой [6]. Как правило, влияние многолучевости в кодовых наблюдениях проявляется в виде знакопеременной функции с нечетко выраженным периодом от 60 до 1000 с. Это позволяет на участках наблюдений длительностью более интервала корреляции получать интервальные оценки статистических характеристик значений различных типов наблюдений и их линейных комбинаций, которые позволяют судить об уровне погрешностей кодовых наблюдений, обусловленных многолучевым распространением сигналов.

Применение БИНС переменной размерности позволяет исключить из рассмотрения наихудшие из измерительных каналов для решения конкретной целевой за-



дачи в режиме реального времени. Применение методов оптимальной совместной обработки сигналов спутниковой навигационной системы и избыточного числа датчиков бесплатформенной инерциальной системы переменной размерности, реализующей метод инвариантного контроля виртуально стабилизированных платформ, приводит к уменьшению погрешностей навигации ТС. Измерения инерциальных навигационных измерителей характеризуются очень малыми значениями шумов и квазисистематическими смещениями, которые медленно дрейфуют со временем. Аппаратура спутниковой навигации имеет минимальный дрейф, однако для ее работы характерно наличие шумов различной природы. Используя статистические модели обеих систем, с помощью алгоритма фильтрации можно уменьшить дисперсию навигационных определений и минимизировать влияние систематической составляющей на результаты оценивания навигационных параметров [9].

В качестве исходных данных для ИНС были приняты начальные значения, аналогичные начальным значениям для АСН и стандартные значения ошибок инерциальных измерителей типовых ИНС [1].

Анализ графической информации, представленной на рис. 4 и 5, показывает, что на аномальном участке функционирования АСН при отсутствии комплексирования навигационных подсистем наблюдается резкое ухудшение точности навигационных определений. Для предлагаемой комплексной навигационной системы ТС обобщенная характеристика точности навигационных определений σ_{Σ} в нормальном режиме функционирования АСН не менее чем на 20 % лучше, чем при использовании для навигации ТС только АСН. Кроме того, применение инерциально-спутниковой навигационной системы ТС, реализующей метод инвариантного контроля виртуально стабилизированных платформ обеспечивает требуемую точность навигационных измерений и на аномальном участке функционирования АСН.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение методов оптимальной совместной обработки навигационной информации приводит к уменьшению погрешностей навигации ТС. Повышение точ-

ности управления транспортными средствами в различных условиях функционирования позволяет повысить производительность и снизить себестоимость транспортных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бабич О. А.* Обработка информации в навигационных комплексах — М.: Машиностроение, 1991. — 512 с.
2. *Генике А. А., Побединский Г. Г.* Глобальная спутниковая система определения местоположения и ее применение в геодезии. — М.: Картогеоцентр — Геодезиздат, 1999. — 272 с.
3. *Макаренко В. Г., Подорожняк А. А., Рудаков С. В., Швец С. В.* Бесплатформенная комплексная навигационная система для управления транспортными средствами // Системи обробки інформації. — 2006. — Вип. 1 (52). — С. 83–93.
4. *Фоменко О. Н., Журавлев А. А., Макаренко В. Г.* Инвариантный контроль и коррекция комплексированных навигационных систем в задачах универсализации управления аэробаллистических летательных аппаратов // Системи обробки інформації. — 2002. — Вип. 6 (22). — С. 83–93.
5. *Соловьев Ю. А.* Спутниковая навигация и ее приложения. — М.: Эко-Трендз, 2003. — 326 с.
6. *Лебедев Д. В., Ткаченко А. И.* Системы инерциального управления. Алгоритмические аспекты. — Киев: Наукова думка, 1991. — 208 с.
7. *Система геодезических параметров Земли «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90).* Справочный документ / Галазин В. Ф., Каплан Б. Л., Лебедев М. Т. и др. — М.: Координационный науч.-информ. центр, 1998. — 36 с.
8. *Фоменко О. Н., Журавлев А. А., Макаренко В. Г.* Согласование отсчетной базы виртуально стабилизированных платформ комплексированных навигационных систем летательных аппаратов // Системи обробки інформації. — 2001. — Вип. 5 (15). — С. 232–242.
9. *Кукушкин Ю. А., Богомолов А. В., Ушаков И. Б.* Математическое обеспечение оценивания состояния материальных систем. — М.: Новые технологии, 2004. — 32 с.

☎ (495) 361-29-31;

e-mail: med_bog@mail.ru

Статья представлена к публикации членом редколлегии С. Д. Земляковым. □

Новая книга

Васильева О. Н., Засканов В. В., Иванов Д. Ю., Новиков Д. А. Модели и методы материального стимулирования: Теория и практика. — М.: ЛЕНАНД, 2007. — 288 с.

Описаны модели и методы материального стимулирования. Первая глава содержит описание постановки и общих подходов к решению задач согласования интересов участников организационных систем. Вторая глава отражает современное состояние исследований базовых математических моделей стимулирования. Главы с третьей по шестую носят прикладной характер и содержат описание анализа и синтеза систем стимулирования на различных объектах: предприятиях специального машиностроения, предприятиях автомобилестроения, авиастроения, а также в медицинских учреждениях.

Предназначена для широкого круга читателей, интересующихся проблемами стимулирования в организационных системах — студентов и преподавателей вузов, аспирантов, руководителей предприятий и организаций, сотрудников отделов по управлению персоналом (HR-отделов).

БИФУРКАЦИОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ АДЕКВАТНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ КОМПАНИЯМИ В ПРОЦЕССЕ РЕФОРМИРОВАНИЯ

В. Г. Клепарский, Ек. В. Клепарская

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

Изучены изменения адекватности управления, реализуемого компаниями электроэнергетики России в процессе перехода к рыночным условиям. Обнаружено обусловленное качественным изменением управления бифуркационное уменьшение стандартного отклонения от центральной линии зоны аттракции, формируемой конкурентным сообществом.

Электроэнергетика как системообразующая отрасль народного хозяйства Российской Федерации на протяжении многих лет была донором всей экономики и постоянно попадала в «ножницы» — опережающий рост цен на первичные энергоносители и хронические неплатежи на розничном рынке вследствие «неотключаемости» многочисленных групп потребителей. Благодаря энергетике решались и макроэкономические задачи — сдерживалась инфляция. Как результат, в отрасли сложилась крайне неэффективная система регулирования цен на электроэнергию, когда в случае снижения издержек производства действовал принцип «инициатива наказуема» и регулирующая комиссия наказывала «отличившихся», сохраняя низкий тариф на следующий период регулирования. Кроме того, процесс регулирования цен оказался чрезмерно зависящим от решений региональных властей. В этих условиях неизбежными оказались спад производства и, соответственно, уменьшение роста объема продаж, как это можно проследить по представленным на рис. 1 профилям притягивающего многообразия — зоны аттракции, формируемой крупнейшими энергосистемами в процессе саморазвития.

Указанные недостатки управления электроэнергетикой должны были быть устранены путем реструктуризации энергетической отрасли (Постановление Правительства РФ № 526 «О реформировании электроэнергетики Российской Федерации» от 11 июля 2001 г.). Реформой предусматривалось создание оптового рынка электроэнергии (мощности). Уже первые результаты реформирования позволили энергетикам существенно увеличить тарифы. Стоимость электроэнергии для населения увеличилась в 2002 г. в среднем на 47,9 %, для крупных промышленных потребителей — на 20,9 %. На оптовом рынке электроэнергии (мощности) среднеотпускные тарифы выросли на 21,3 %. Однако этим повышением тарифов смогли воспользоваться, как это можно заметить по перестановкам в зоне аттракции крупнейших энергетических компаний России (см. рис. 1), в основном энергосистемы, обслуживавшие области с подымающейся промышленностью, а значит, и с увеличивающейся покупательной способностью.

Для более полной оценки реализуемых в результате реформ изменений адекватности управления энергетическими компаниями — сложнейшими саморазвивающимися системами — был применен системный подход, согласно которому проблема реализации саморазвивающейся системой адекватного управления может быть сведена к проблеме формирования системой и окружающей средой соответствующего конечномерного притя-

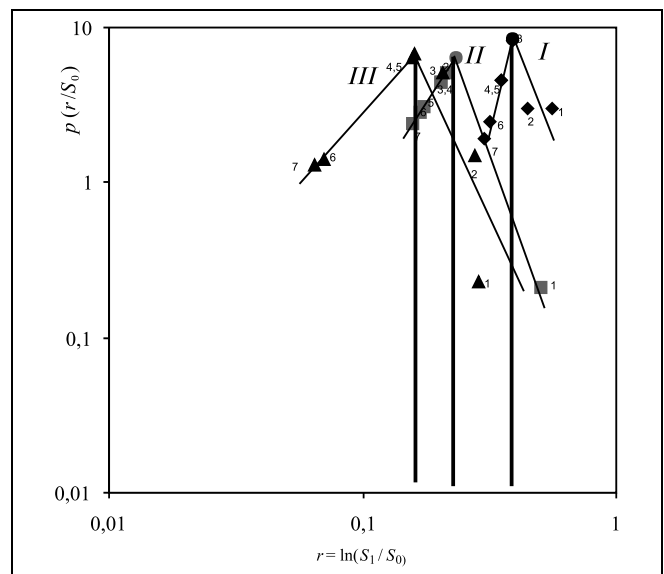


Рис. 1. Плотность распределения $p(r/S_0)$ ежегодного роста объема реализации $r = \ln(S_1/S_0)$ для самых крупных электроэнергетических компаний России в 2000—2003 гг. (не учтены РАО ЕЭС и Мосэнерго):

I — 2000 г. — 1 — Татэнерго, 2 — Кузбасэнерго, 3 — Башкирэнерго, 4 и 5 — Ленэнерго, Самараэнерго, 6 — Свердловэнерго, 7 — Пермэнерго; II — 2001 г. — 1 — Ленэнерго, 2 — Самараэнерго, 3 и 4 — Пермэнерго и Татэнерго, 5 — Свердловэнерго, 6 — Башкирэнерго, 7 — Кузбасэнерго; III — 2002 г. — 1 — Ленэнерго, 2 — Самараэнерго, 3 — Пермэнерго, 4 и 5 — Кузбасэнерго и Свердловэнерго, 6 — Татэнерго, 7 — Башкирэнерго



гивающего многообразия — аттрактора и к проблеме отслеживания системой центральной линии этой зоны аттракции. При этом наглядная оценка адекватности управления, реализуемого системой в процессе саморазвития, может быть получена путем оценки стандартного отклонения σ от центральной линии аттрактора (более подробно см. нашу статью [1]). В этих целях по данным, ежегодно публикуемым в журнале «Эксперт» были построены профили зон аттракции — кривые плотности распределения $p(r/S_0)$ ежегодного роста объема реализации $r = \ln(S_1/S_0)$ в зависимости от объема начальных продаж при выбранных средних значениях объема реализации продукции S_0 . Здесь S_1 и S_0 — продажи фирмы за два следующих друг за другом года и $s_0 = \ln S_0$. По этим профилям были получены значения стандартного отклонения $\sigma(S_0)$ при выбранных средних значениях объема реализации продукции S_0 и построены кривые зависимостей $\sigma = f(S_0)$. Для взаимного сопоставления кривых $\sigma = f(S_0)$ полученные средние значения объема реализации S_0 пересчитывались в доллары США. Пересчет производился по среднему курсу за соответствующий год.

Полученные для энергосистем России для 2000—2003 гг. зависимости $\sigma(S_0) = f(S_0)$ (в логарифмическом масштабе) представлены на рис. 2. Можно заметить, что в 2002 г. (после введения в действие Постановления Правительства РФ № 526 «О реформировании электроэнергетики...») произошло заметное расслоение энергосистем по значению стандартного отклонения $\sigma(S_0)$ от центральной линии зоны аттракции. Крупные и крупнейшие энергосистемы существенно консолидировали свое поведение, что визуализировалось в заметном снижении величины $\sigma(S_0)$. В то же время, у основной массы средних (по объемам продаж) энергосистем было отмечено увеличение этого отклонения. Данные за 2003 г. (кривая 5) свидетельствуют о последующем консолидированном снижении значений стандартного отклонения $\sigma(S_0)$, а значит, и о последующем сужении зоны аттракции для всех обследованных энергосистем. Для более полного представления о происшедших в ходе реформ изменениях адекватности реализуемого системами управления были построены графики изменения во времени T средних (за год) значений стандартного отклонения $\sigma_{cp}(T)$.

Представленные на рис. 3 зависимости $\sigma_{cp}(T)$ позволяют заметить, что отмеченное в 2002 г. увеличение значений стандартного отклонения $\sigma(S_0)$ для средних (по объему продаж) энергосистем было неустойчивым явлением. В то же время, реализованное в 2002 г. сужение зоны аттракции для крупных и крупнейших электроэнергетических компаний (а оно могло быть достигнуто лишь путем повышения адекватности управления — см., например, статью [1]) не только сохранилось в последующем, но и распространилось на средние (по объему продаж) энергосистемы. Ход зависимости $\sigma_{cp}(S_0)$, имеющий бифуркационный характер, можно объяснить, если учесть, что с 1 ноября 2003 г. часть электроэнергии (мощности) стала продаваться и покупаться по договорным ценам, которые определяются посредством конкурентного отбора поданных поставщиками и покупателями ценовых заявок. В этих условиях от менеджмента

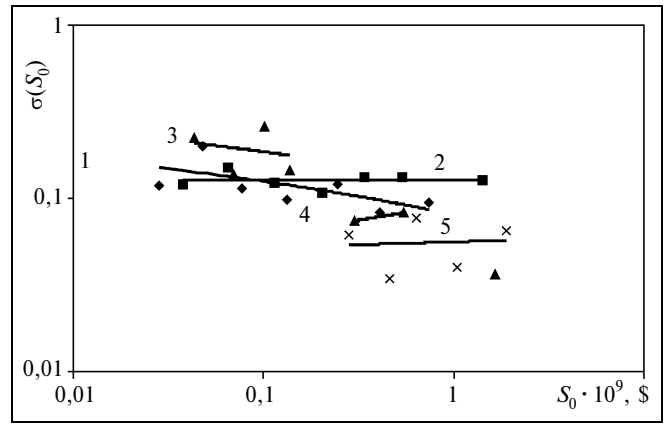


Рис. 2. Зависимости $\sigma(S_0)$ для систем электроэнергетики за 2000—2003 гг.:

1 — 2000 г.; 2 — 2001 г.; 3 — 2002 г. — основная масса предприятий; 4 — 2002 г. — крупнейшие системы; 5 — 2003 г.

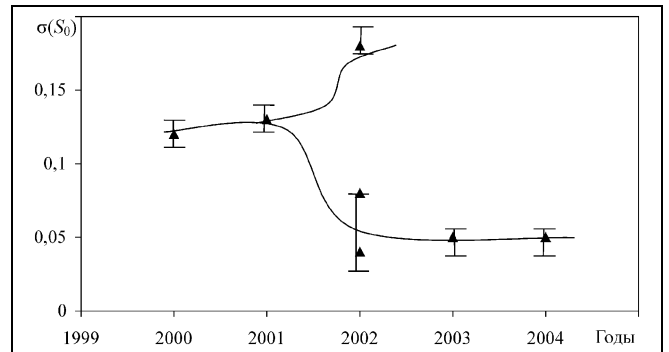


Рис. 3. Динамика изменений средних значений стандартного отклонения $\sigma_{cp}(S_0)$ в процессе реформирования электроэнергетики

потребовалось не только снижение издержек компании, но и возможно более точное определение потенциальных возможностей конкурентов. При этом вероятность принятия менеджментом компании каких-либо волюнтаристских (флуктуационных в терминах нелинейной динамики) решений резко уменьшается. Отражением такого качественного изменения реализуемого компанией управления служит бифуркационное переключение на более адекватное отслеживание энергосистемой центральной линии формируемой конкурентным сообществом зоны аттракции. На графике это визуализируется как снижение уровня средних значений стандартного отклонения $\sigma(S_0)$ в процессе саморазвития.

ЛИТЕРАТУРА

1. Клепарский В. Г., Клепарская Ек. В. Адекватность управления саморазвивающимися системами социально-экономической природы (на примере предприятий черной металлургии // Проблемы управления — 2006. — № 5. — С. 23—29.

☎ (495) 334-92-50;

e-mail: kleparvg@ipu.ru

Статья представлена к публикации членом редколлегии Ф. Т. Алескеровым. □

МОДЕЛЬ ОПТОВОГО РЫНКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ПЛАНИРОВАНИИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ В УСЛОВИЯХ РЕФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Г. В. Овсянникова

ФГУП концерн «Росэнергоатом», г. Москва

Показана необходимость совершенствования методик ценообразования энергокомпаний в условиях реформирования электроэнергетики. Предложено использовать модель оптового рынка электроэнергии (мощности) для планирования деятельности энергетических предприятий.

С 1 ноября 2003 г. в России действует переходный период реформирования оптового рынка электроэнергии (мощности). С началом переходного периода реформы часть электроэнергии (мощности) стала продаваться и покупаться по нерегулируемым ценам — договорным и (или) равновесным. Равновесные цены определяются на основе взаимодействия спроса и предложения на рынке посредством проведения конкурентного отбора поданных поставщиками и покупателями ценовых заявок [1—3].

Общим направлением реформы, которое закреплено законодательно, предусмотрено постепенное увеличение объемов купли/продажи электроэнергии по свободным (нерегулируемым) ценам [1, 2]. Фактически это требует от энергетических предприятий совершенствования методических подходов к ценообразованию на электроэнергию (мощность).

Базовым методом ценообразования в электроэнергетике служит метод полных затрат [3, 4], согласно которому тариф (цена) на электрическую энергию (мощность) определяется, исходя из необходимой валовой выручки компании от реализации каждого вида продукции (услуг) и объема продукции (услуг) за расчетный период регулирования (год) [3]. Годовой объем производства продукции определяется, исходя из сводного прогнозного баланса производства и поставок электрической энергии (мощности), который составляется в рамках ЕЭС России по принципу минимума суммарной стоимости электроэнергии, поставляемой потребителям [3].

В рыночных условиях метод полных затрат по-прежнему составляет методическую основу ценообразования на электроэнергию (мощность), поскольку для обеспечения бесперебойного производственного процесса производителю требуется компенсация всех понесенных им затрат, однако этот метод позволяет определить только минимальную границу ценового предложения компании на рынке.

В то же время в условиях рынка в процессе ценообразования требуется принять во внимание не только уровень издержек компании, но и провести оценку ряда прочих факторов, в частности, определить потенциальных конкурентов компании, их ценовые предложения и объемы поставок на рынок.

Для решения этой задачи предлагается воспользоваться моделью российского оптового рынка электроэнергии (мощности). В качестве примера реально существующей модели целесообразно привести модель оптового рынка, созданную в Научном центре прикладных исследований.

Единая энергетическая система в модели представлена в виде графа, узлам которого соответствуют объединенные энергетические системы (ОЭС), а дугам — межсистемные электрические связи. Данная модель работает на основе программного комплекса, который в свою очередь включает в себя:

- базу данных по энергообъектам Европейской части ЕЭС России,
- блок формирования сценариев расчета,
- модель оптимизации оптового рынка,
- собственно программу диалога.

База данных содержит информацию по энергетическим объектам каждой ОЭС Европейской части ЕЭС России (практические расчеты проведены на основе фактических данных за 2002 г.).

Блок формирования сценариев расчета позволяет приспособить оптимизационные расчеты к возможности изменения факторов внешней среды. Сценарии для расчета формируются, исходя из заданных уровня рентабельности работы генерирующих объектов и уровня энергопотребления.

Автоматизированное управление работой программного комплекса обеспечивает программа диалога. Полная автоматизация позволяет проводить многовариантные расчеты. Диалог программно-вычислительного



комплекса предполагает заполнение базы данных исходной информацией, проведение расчета при заданном сценарии по оптимизации функционирования оптового рынка, варьирование данными для многовариантных расчетов, получение результатов расчета в виде таблицы.

Оптимизация работы оптового рынка ведется с помощью решения задачи линейного программирования на основе симплекс-метода. В качестве критерия оптимизации выступает критерий минимизации суммарной стоимости поставляемой на рынок электроэнергии.

В результате оптимизационных расчетов формируются по ОЭС Европейской части России годовые объемы мощности и электроэнергии генерирующих предприятий, определяются значения межсистемных перетоков, среднегодовых среднееотпускных тарифов поставщиков по кварталам. Именно эти данные позволяют энергокомпаниям оценивать конкурентные позиции и границы собственного ценового предложения на рынке. Например, диапазон допустимого ценового предложения компании на рынке может определяться, исходя из минимального уровня ценового предложения, полученного методом полных затрат, и максимального, в качестве которого может быть принят смоделированный уровень ценового предложения ближайшего конкурента.

Результаты моделирования по ОЭС Центра по сценарию, который предполагает установление объемов энергопотребления по ЕЭС Европейской части России и показателей рентабельности работы генерирующих предприятий на уровнях, фактически действовавших в 2002 г., представлены на рис. 1—4, см. третья стр. обложки.

Из рис. 1—3 очевидна конкурентная ситуация на рынке в годовом разрезе по показателю «цена». С учетом особенностей покрытия графика нагрузки и динамики производства электроэнергии в течение года каждый вид производителя имеет свою нишу на рынке, и поэтому оценка конкурентных позиций должна проводиться в рамках определенной конкурентной группы (ГЭС, ГРЭС и пр.). В этой связи интерес представляет полученные с помощью моделирования среднегодовые доли поставок электроэнергии генерирующих предприятий по ОЭС Центра (см. рис. 4 на третьей стр. обложки).

Из рис. 4 видно, что по ОЭС Центра максимальную долю рынка имеют АЭС, работающие значительную часть года и покрывающие базовую часть графика нагрузки. По результатам моделирования это более 50 % всего объема поставок. Такая доля АЭС в общем объеме производства по рассматриваемой ОЭС Центра объясняется также высокой концентрацией атомных станций в Европейской части страны. За АЭС следуют крупные тепловые станции (ГРЭС), доля которых на рынке также существенна (по результатам моделирования это более 25 %). Гидроэлектростанции производят незначительный объем электроэнергии, поскольку, главным образом, работают в полупиковом и пиковом режимах.

Полученные результаты моделирования демонстрируют, что развитие конкурентных отношений возможно между производителями отдельных конкурентных групп (например, между ГРЭС), а также между АЭС и ГРЭС.

В рыночных условиях крупные ГРЭС, работающие на относительно дешевом органическом топливе, могут успешно конкурировать с АЭС. По рассматриваемой ОЭС Центра к таким ГРЭС относятся Костромская и Конаковская ГРЭС, использующие в качестве основного топлива природный газ. С учетом возможности уве-

личения числа часов использования мощности крупных ГРЭС в течение года такие станции могут существенно улучшить свои позиции на рынке (снизить стоимость производства электроэнергии). Однако следует принимать во внимание действующие и определенные законодательными нормами приоритеты загрузки генерирующих мощностей системы, которые оказывают влияние на возможные объемы производства электроэнергии [1].

Рассмотренная модель оптового рынка электроэнергии (мощности) может использоваться в различных целях, в том числе в процессе принятия решения о ценах компаний, в целях оценки конкурентных позиций компании на рынке, краткосрочного планирования и др.

Особо подчеркнем, что по мере либерализации оптового рынка электроэнергии (мощности) сокращается объем общедоступной информации о тарифах (ценах) на электрическую энергию и мощность производителей, поэтому в условиях рыночной неопределенности и дерегулирования отрасли результаты моделирования приобретают особое значение, так как до момента создания самостоятельного рынка мощности и при наличии понижающих стоимость мощности коэффициентов, а также мер антимонопольного регулирования (недопущения манипулирования ценами на рынке) производителям крайне необходимо иметь ценовые ориентиры (с учетом стоимости мощности) деятельности их основных конкурентов на нерегулируемом рынке.

Таким образом, развитие рыночных отношений в энергетике изменяет принципы ценообразования в отрасли. В современных условиях на уровень ценового предложения производителей влияют не только издержки производства, но и ряд других факторов, в том числе деятельность прочих производителей. В этой связи рассмотренная модель оптового рынка электроэнергии (мощности) может быть использована в качестве дополнения к методике полных затрат и применена в качестве инструмента, позволяющего оценить деятельность конкурентов, спрогнозировать их основные показатели работы по различным сценариям и с учетом этих показателей планировать уровень собственного ценового предложения на рынке. При этом рассмотренная модель может быть использована не только в процессе ценообразования, но и в других целях.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Постановление* Правительства Российской Федерации от 24 октября 2003 г. № 643 «О правилах оптового рынка электрической энергии (мощности) переходного периода».
2. *Постановление* Правительства Российской Федерации от 31 августа 2006 г. № 529 «О совершенствовании порядка функционирования оптового рынка электрической энергии (мощности)».
3. *Постановление* Правительства Российской Федерации от 26 февраля 2004 г. № 109 «О ценообразовании в отношении электрической и тепловой энергии в Российской Федерации».
4. *Электроэнергетический рынок и тарифы* / Под ред. Б. В. Панкова. — Нижний Новгород: НГТУ, 2002. — С. 252.

☎ (495) 239-43-17,

e-mail: ovsyannikova@rosenergoatom.ru

Статья представлена к публикации членом редколлегии
Ф. Т. Алескеровым. □

РАЗРАБОТКА МЕХАНИЗМОВ ПРИВЛЕЧЕНИЯ ФОНДАМИ ФИНАНСОВЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ КУЛЬТУРНЫХ, СОЦИАЛЬНЫХ И ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ

М. Ю. Гладков

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

Основное внимание уделено вопросам развития эндаунмента (фондов) и повышению эффективности использования его финансового потенциала при решении задач рассматриваемого класса.

Одной из острых проблем, которые регулярно возникают в процессе решения крупномасштабных социально-экономических задач, является, к сожалению, хроническая нехватка выделяемых из госбюджета финансовых ресурсов. Один из путей «смягчения» остроты проблемы недофинансирования состоит в привлечении ресурсов из иных (внебюджетных) источников, например, путем спонсорства и благотворительности коммерческих негосударственных структур. В настоящее время в связи с реализацией приоритетных национальных проектов Правительство Российской Федерации активно ищет дополнительные источники средств для решения комплекса социальных проблем. На ряде проводимых под эгидой Правительства РФ совещаний и форумов (в частности, на всероссийском форуме «Общество, благотворительность и национальные проекты») выдвигается идея обращения к положительному опыту развитых стран — создать и развивать систему благотворительных фондов, которые должны сыграть существенную положительную роль в содействии эффективной реализации национальных проектов, культурных, социальных и образовательных программ.

В настоящее время в Правительстве РФ идет проработка проекта Закона о «целевом капитале», который призван помочь с финансированием культурной, социальной и образовательной сфер. Для российских условий наиболее эффективным представляется механизм, получивший на Западе название *эндаунмент* (endowment), представляющий собой ресурсный капитал некоммерческих организаций и фондов (например, высоколиквидные акции или ценные бумаги), который вкладывается в коммерческую деятельность с целью получения

дохода, который, в свою очередь, предполагается вкладывать в благотворительную деятельность и, в частности, в культурные, социальные и образовательные программы [1, 2].

Целевые культурные, социальные и образовательные программы имеют различную направленность по назначенным целям и средствам, многовариантны по назначению и требуют значительных средств на их реализацию. В условиях ограниченности бюджетных ресурсов необходима интеграция усилий и средств, направляемых на реализацию целевых программ рассматриваемого типа на основе всестороннего анализа их особенностей и учета интересов участников, финансирующих на благотворительной основе эти программы. При этом одной из важнейших является задача выбора из некоторого множества целевых культурных, социальных и образовательных программ максимального по мощности базового набора, который может быть обеспечен финансированием с учетом содержания каждой программы и интересов участников (инвесторов, в качестве которых будем рассматривать *эндаунмент* — фонды и иные источники «целевого капитала»).

Пусть $P = \{P_i\}$, $i = \overline{1, I}$ — множество культурных, социальных и образовательных по целевому назначению программ. Как правило, интересы инвесторов (или их представителей), участвующих в соответствующих программах, различны. Представители $\Pi = \{\Pi_j\}$, $j = \overline{1, J}$, проявляют свои интересы через средства, которые вкладывают для финансирования социальных программ, а затраты на реализацию каждой из программ есть $S = \{S_i\}$,



$i = \overline{1, I}$. Выбор и реализация целевых программ осуществляется с участием специального финансово-координирующего центра органов исполнительной власти в той или иной организационной форме, имеющего определенные, но ограниченные финансовые средства поддержки решений по выбору программ и обеспечивающего гибкую политику инвестиций в целевые программы с учетом индивидуальных интересов всех участников и группы представителей в целом [3].

Координирующий центр представляет и поддерживает решения на различных уровнях обсуждения и согласования. Представитель инвестора в пределах выделенных средств b_j может вкладывать их в разработку интересующих его культурных, социальных и образовательных программ. Выбор программ осуществляется в условиях ограниченных объективными причинами и (или) договоренностью средств R на разработку всего множества программ. В этих условиях необходимо определить состав базового набора программ при заданных затратах на их реализацию с учетом интересов сторон, принимающих решение.

Рассмотрим интересы различных сторон.

Определим переменную

$$y_i = \begin{cases} 1, & \text{если } \left(S_i - \sum_{j=1}^J z_{ij} \right) x_i \leq 0, \\ 0, & \text{если } \left(S_i - \sum_{j=1}^J z_{ij} \right) x_i > 0, \end{cases}$$

где z_{ij} — размер вклада j -го представителя инвестора в i -ю программу,

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{если } j\text{-я программа включена} \\ & \text{в базовый набор,} \\ 0, & \text{если не включена.} \end{cases}$$

Переменная y_i указывает на обеспеченность i -й программы средствами ($y_i = 1$) либо на дефицит средств для реализации i -й программы ($y_i = 0$).

Введем выражение

$$\varphi(x_i, z_{ij}) = \sum_{i=1}^I y_i, \quad (1)$$

определяющее набор программ полностью обеспеченных финансированием, и функцию $F(x_i, z_{ij})$, определяющую набор программ с дефицитом финансовых средств:

$$F(x_i, z_{ij}) = \sum_{i=1}^I \left(S_i - \sum_{j=1}^J z_{ij} \right) x_i = \sum_{i=1}^I a_i x_i, \quad (2)$$

где $a_i = S_i - \sum_{j=1}^J z_{ij} > 0$.

Выражения (1) и (2) представляют интересы координирующего центра, который стремится обеспечить

$$\max \sum_{i=1}^I y_i \text{ и } \min F(x_i, z_{ij}).$$

Введем меру участия отдельных инвесторов (спонсоров) в лице их представителей в финансировании программ в виде матрицы предпочтений

$$A = \|a_{ij}\|, \quad i = \overline{1, I}, \quad j = \overline{1, J},$$

$$\text{где } a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } j\text{-й представитель участвует} \\ & \text{в финансировании } i\text{-й программы,} \\ 0, & \text{если не участвует.} \end{cases}$$

Тогда функция

$$\varphi_j(x_i, z_{ij}) = \sum_{i=1}^I a_{ij} y_i \quad (3)$$

определяет число программ j -го представителя инвестора, обеспеченное финансированием.

Данная функция отражает «выигрыш» (интерес) представителя инвестора, который он стремится увеличить, управляя размещением средств в программы. Поэтому каждый представитель, вкладывая средства, стремится обеспечить $\max \sum_{i=1}^I a_{ij} y_i$.

Учитывая выражения (1) — (3), целевая функция координирующего центра может быть записана в следующем виде:

$$\max_{\{y_i\}} \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I a_{ij} y_i. \quad (4)$$

Данная функция в значительной мере отражает интересы всех представителей, так как максимизирует общее число программ, обеспеченных финансированием.

В зависимости от поставленных целей выбора программ и учета различных интересов представителей инвесторов и координирующего центра могут быть сформулированы различные варианты постановки задач путем использования функций (1)—(4) в качестве целей и ограничений.

Сформулируем задачу выбора программ, обеспечивающего реализацию максимального числа программ в наборе $\max \sum_{i=1}^I x_i$ при ограничениях на средства каждого представителя инвесторов

$$\sum_{i=1}^I z_{ij} x_i \leq b_j, \quad j = \overline{1, J}, \quad (5)$$

и суммарный дефицит на реализацию базового набора программ

$$\sum_{i=1}^I a_i x_i \leq R. \quad (6)$$

Отметим, что координирующий центр заинтересован в обеспечении максимального числа программ в базовом наборе, поскольку интересы отдельных представителей инвесторов, как правило, выражаются в увеличении числа полностью обеспеченных финансированием программ, в которые они вложили средства.

В этом случае задача формулируется как многокритериальная в виде:

$$\sum_{i=1}^I x_i \rightarrow \max, \quad \sum_{i=1}^I y_i \rightarrow \max, \quad \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I a_{ij} y_i \rightarrow \max$$

при ограничениях (5) и (6).

Сформулированные задачи оптимизации механизмов привлечения внебюджетных средств фондов для реализации культурных, социальных и образовательных программ представляют собой задачи дискретного программирования комбинаторного типа, для решения которых могут быть применены известные методы, основанные на анализе свойств и характеристик этих задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гладков М. Ю. Фондовые механизмы развития // Тр. XII междунар. конф. «Проблемы управления безопасностью сложных систем» / РГГУ — М.: 2004. — С. 166—168.
2. Гладков М. Ю., Шелков М. Б. Анализ финансово-экономической инфраструктуры малого предпринимательства // Тр. XIII междунар. конф. «Проблемы управления безопасностью сложных систем» / РГГУ — М.: 2005. — С. 426—427.
3. Гладков М. Ю. Об организации инвестиций в некоммерческие фонды // Материалы междунар. науч. конф. «Проблемы регионального и муниципального управления» / РГГУ — М., 2005. — С. 108—111.

☎ (495) 334-89-09;

e-mail: mh@celts.ru

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



XV МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ "ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ"

Москва, декабрь 2007 г.

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН

Предполагается рассмотреть: проблемы и методы оценки безопасности различного типа; механизмы управления безопасностью; правовое регулирование вопросов безопасности; формирование структур систем управления безопасностью; теорию и методы принятия решений, связанные с безопасностью; прогнозирование и моделирование процессов управления безопасностью; планирование и стратегическое управление в системах обеспечения безопасности; методы построения средств информационной поддержки принятия решений в системах управления безопасностью; системы управления силами и средствами при управлении безопасностью.

Конференция состоится в Институте проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН по адресу: Москва, Профсоюзная ул., 65. Официальные языки конференции — русский, английский. Продолжительность работы конференции — 1 день.

Заявки на участие в конференции принимаются по адресу:
117997 Москва, ГСП-7, Профсоюзная ул., 65, Институт проблем управления, лаб. 20,
Оргкомитет международной конференции;
тел. (495) 334-89-59, e-mail: Conf20@jpu.rssi.ru

Материалы представляются на дискете плюс 1 экз. в распечатанном виде (2—4 стр.); на этикетке дискеты указать ф.и.о. авторов и имя файла, названного по фамилии первого автора; или высылаются по электронной почте. В графе "Тема" укажите — Конференция. Необходимо сообщить сведения об авторах: фамилию, имя, отчество автора(ов); должность, ученое звание; место работы (полное название и аббревиатура); почтовый адрес для переписки (обязательно указать индекс) и(или) e-mail; номер телефона для связи.

Требования к оформлению. Материалы должны быть представлены в редакторе Word, версии не ниже 6.0; формат А4, заполняемый текстом 115 × 165 мм (параметры страницы: верхнее поле — 2,5 см; нижнее — 10,7 см; левое — 4,7 см; правое — 4,8 см). Шрифт — Times New Roman, 10 пунктов через 1 интервал, красная строка — 0,5 см, страницы не нумеруются. Библиографические ссылки в тексте даются в квадратных скобках, рисунки должны допускать возможность масштабирования.

VI МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ» (AIS'06) XXI МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ САПР» (САД—2006)

Конференции состоялись 3—10 сентября 2006 г. в г. Дивноморское Геленджикского района Краснодарского края. Организатор — Таганрогский государственный радиотехнический университет (ТРТУ) VI Международная научно-техническая конференция. Общее число участников более 200 человек из 8-ми зарубежных стран и 37-ми городов России. Конференции проходили в рамках реализации Приоритетного национального проекта «Образование в ТРТУ: Инновационная образовательная программа "Инновационный механизм развития взаимодействия ТРТУ и бизнеса"». Для организации и проведения конференции AIS'06 был получен грант Российского фонда фундаментальных исследований. Спонсорами конференций были московские представительства известных компаний «Cadence Design Systems» (США) и SAP (Германия).

Основные направления работы конференций: эволюционное моделирование; мягкие вычисления, нечеткие модели и знания; интеллектуальные системы в менеджменте; прикладные интеллектуальные системы; многоагентные системы и принятие решений; высокопроизводительные системы и нейрокомпьютеры; когнитивное моделирование; интеллектуальные САПР; моделирование сложных систем; информационные технологии; информационные технологии в образовании; биоинформатика. Большинство представленных докладов отличались научной новизной и актуальностью рассматриваемых вопросов, глубиной и завершенностью проведенных и обсуждаемых исследований и разработок. Кратко остановимся на докладах, вызвавших особый интерес участников.

В докладе *Б. Е. Федунова* «Интеллектуальные системы технических антропоцентрических объектов» представлена макромодель технического антропоцентрического объекта, включающая в себя описание внутренней семантической структуры объекта и формализацию всей совокупности его сеансов функционирования. На ее основе дана классификация бортовых и внебортовых интеллектуальных систем. Описана структура баз знаний бортовых оперативно советующих экспертных систем (БОСЭС) типовых ситуаций (ТС) сеансов функционирования. Отличительная особенность антропоцентрических объектов (Антр/объектов) состоит в развитом бортовом алгоритмическом и индикационном обеспечении (АиИО).

На начальном этапе проектирования таких объектов облик АиИО системообразующего ядра объекта представляется в форме спецификаций бортовых алгоритмов. В состав таких алгоритмов входят БЦВМ-алгоритмы, предназначенные для реализации на бортовых цифровых вычислительных машинах, и алгоритмы деятельности экипажа. Последние определяют облик информационно-управляющем поле кабины экипажа, и перечень необходимых органов на нем (в частности, для реализации диалоговых режимов «экипаж—бортовая аппаратура»).

При проектировании бортовых алгоритмов современных Антр/объектов инженеры-проектировщики переходят от автоматизации отдельных фрагментов сеансов функционирования, как это было на Антр/объектах предыдущих поколений, к автоматизации отдельных ТС сеансов. Это потребовало уже на начальной стадии разработки АиИО системообразующего ядра использовать новую макромодель Антр/объекта, позволяющую инженерам при проектировании АиИО постоянно держать в поле зрения всю совокупность его сеансов функционирования.

При проектировании АиИО такая макромодель дает возможность конструкторам, базируясь на достижениях теории интеллектуальных систем, применять на борту интеллектуальные системы и ставить задачу по разработке интеллектуальных систем подготовки предстоящего сеанса функционирования и анализа его результатов.

Бортовые оперативно советующие экспертные системы типовых ситуаций предназначены для решения задач второго глобального уровня управления. Это так называемые «тактические задачи» — задачи, определяющие рациональные пути достижения текущей цели ТС, оперативно назначаемой экипажем. Для каждой ТС создается своя БОСЭС. В основу ее структуры базы знаний положена формальная модель предметной области, в которой генеральная задача предстоящего сеанса функционирования, задаваемая перед началом сеанса, представляется через семантическую сеть типовых ситуаций, каждая из которых представляется в свою очередь через семантическую сеть проблемных субситуаций. В ТС выделяется множество значимых событий — событий, несущих с собой проблемы, которые требуют либо немедленного разрешения, либо предварительного про-

странственно-временного прогноза их наступления (модель проблемы, механизмы ее разрешения), когда потребуется немедленное разрешение проблемы (математическая модель пространственно-временного прогноза, модель проблемы, механизмы ее разрешения).

Генеральная задача сеанса функционирования часто решается группой Антр/объектов. Размещаемые на них БОСЭС типовых ситуаций в этом случае должны работать согласованно не только со своим экипажем, но и между собой, образуя коалицию БОСЭС. Трудности создания БОСЭС типовых ситуаций, работающих в коалиции, в настоящее время ни теоретически, ни практически не преодолены. В отличие от «коалиционных» БОСЭС, автономно работающие БОСЭС (даже в интересах взаимодействующей группы) прошли этап создания теории и разработки исследовательских образцов. На повестке дня стоит задача создания базовых образцов БОСЭС типовых ситуаций и выявления конструктивных механизмов их адаптации к бортовой информационной среде Антр/объекта. В докладе представлены формальные структуры баз знаний, характерные для автономно работающих БОСЭС.

В докладе *А. П. Еремеева и И. Е. Куриленко* «Применение механизма временных рассуждений в системе автоматизации парковочного комплекса» представлены исследование и реализация средств моделирования рассуждений с учетом временного фактора — темпоральных (временных) рассуждений. Их актуальность связана с появлением интеллектуальных систем, в частности, систем поддержки принятия решений реального времени, для мониторинга и управления сложными объектами, ориентированных на поиск решения в условиях достаточно жестких временных ограничений и наличия большого объема информации, изменяющейся во времени. В докладе представлены основные требования и принципы построения компьютерной системы временных рассуждений, ее базовая архитектура СВР, возможности ее интеграции со средой разработки CLIPS, а также пример ее применения совместно с CLIPS для построения системы автоматизации парковочного комплекса.

В докладе *В. М. Курейчика* «Инновационные механизмы управления научными исследованиями на примере ТРТУ» обсуждены стратегические приоритеты развития технического университета. Они определяются рядом устойчивых тенденций в мировом развитии, изменением социально-экономического базиса страны, а также становлением новой ценностно-смысловой характеристики высшего образования, сформулированной в федеральном законе «Об образовании». Внешние изменения требуют новых подходов при формировании программы развития университета, базирующихся на стратегических приоритетах и концепциях развития по важнейшим направлениям деятельности. На основе анализа проблемных ситуаций функционирования университета по выполнению уставных задач и положений Миссии ТРТУ выявлены следующие приоритетные области развития: образовательная деятельность; научные и инновационные исследования и подготовка кадров высшей квалификации; финансово-экономическая деятельность. В результате выполнения предлагаемой

стратегии будет сформирована система фундаментальной и прикладной подготовки специалистов, способных обеспечить инновационные преобразования, получение новых научных и научно-технических результатов, сохранение и развитие ведущих научных школ, широкое и равноправное участие российской науки и высшего образования в международной научно-технической и образовательной кооперации.

В докладе *А. В. Смирнова* и др. «Интеграция информации в контекстно-управляемых системах поддержки принятия оперативных решений» предложен подход к поддержке принятия оперативных решений с помощью контекстно-управляемой системы поддержки принятия решений. В рамках предлагаемого подхода рассмотрена проблема оперативной интеграции информации, получаемой от разнородных источников, в контексте текущей ситуации. Подход ориентирован на использование онтологической модели знаний, специфицированной средствами формализма объектно ориентированных сетей ограничений. Применение данного формализма позволяет представить онтологическую модель задачи пользователя задачей в ограничениях и интерпретировать ее как задачу удовлетворения ограничений.

Проблема поддержки принятия оперативных решений в период широкого использования информационных технологий сталкивается с необходимостью манипулирования и управления значительными объемами информации и знаний, накопленных в информационных ресурсах, и с необходимостью оперативной обработки динамической информации. Оперативные решения характеризуются тем, что они принимаются на основании хорошо специфицированных знаний, специально предназначенных для решения определенной задачи. Такие решения основываются на предыдущем опыте, они должны приниматься быстро, при этом должны быть учтены возможные альтернативные решения.

В предлагаемом подходе оперативная поддержка принятия решений выполняется в рамках текущей ситуации. Под текущей ситуацией понимается модель задачи, которая сформулирована в запросе пользователя к системе, со значениями переменных задачи. Последние присваиваются на основании оперативной информации, получаемой от информационных источников в динамическом режиме. Предполагается, что данные источники могут быть разнородными.

В рамках подхода выделены несколько типов источников информации: сенсоры, пользователь, базы данных и другие источники, позволяющие организовать к ним доступ средствами Web-сервисов. Часть источников используется для моделирования окружающей среды как набора данных. Это позволяет динамически отслеживать состояние окружающей среды и оперативно обрабатывать поступающую из среды информацию. Задача получения и организации разнородной информации послужила причиной использования модели контекста. В информационных технологиях модель контекста используется для установления, какая информация может быть использована для описания ситуации, в которой находится в данный момент некоторый объект, и для организации информации внутри контекста. В предлагаемом подходе используются два типа контекста: абстракт-



тный и оперативный. Абстрактный контекст представляет собой модель задачи, построенную на основании интеграции знаний проблемной области, релевантных данной задаче, и формальных представлений информационных источников, от которых поступают значения переменным задачи. Оперативный контекст является экземпляром абстрактного контекста с приписанными текущими значениями переменных, входящих в модель задачи.

В докладе *А. П. Рыжова* «Деятельность компании "Cadence Design Systems" в России» отмечено, что «Cadence» — это динамично развивающаяся на рынке САПР электроники компания с годовым оборотом более 1 млрд. долл. США. Целевой рынок: беспроводная связь, вычислительные сети, производители компьютеров, электроника для массового потребления. «Cadence» входит в десятку лучших компаний, которые разрабатывают программные средства и работают в достаточно узком сегменте рынка — разработке САПР электроники. «Cadence» — глобальная корпорация, имеющая сферы влияния как в США, Европе, так и теперь в России. Головной офис располагается в Силиконовой долине в г. Сан-Хосе, имеются представительства в Европе, Азии, Китае, Японии. На российском рынке «Cadence» присутствует 10 лет, имея четыре года представительство в России. В 2004 г. ТРТУ и «Cadence» заключили договор о творческом сотрудничестве. «Cadence» в очень редких случаях предоставляет свое программное обеспечение на льготных основаниях и только в редчайших — бесплатно. В 2005 г. кафедра САПР ТРТУ бесплатно получила программное обеспечение «Cadence» на сумму 600 тыс. евро. Были получены четыре пакета программ САПР печатных плат, интегральных микросхем различной степени интеграции, микросборки и комбинированных систем.

Компания «Cadence» охватывает все этапы проектирования — от начала разработки и до коммерческого продукта, обеспечивая поддержку системного и аппаратного проектирования, разработку радиоэлектроники (либо аналоговой, либо цифровой части), проектирование топологии интегральных схем, этап сертификации и отладку системы в целом. На кафедре САПР и факультете электронного приборостроения было осуществлено внедрение, освоение и сопровождение полученных программных продуктов. Компания «Cadence» работает в трех основных направлениях: собственно разработка программ, поддержка в виде технического сопровождения, а также сфера услуг. Направление развития «Cadence» на российском рынке включает в себя радиоэлектронику и радиоэлектронную аппаратуру, разработку и производство современных интегральных схем.

Университетские программы особенно важны для «Cadence», как и проблемы подготовки кадров. К примеру, у многих разработчиков возникают проблемы во время работы с современными САПР, а продвинутые студенты и аспиранты ориентируются и разбираются лучше. Подготовка новых кадров должна происходить таким образом, чтобы отечественная радиоэлектронная промышленность наконец-таки вышла на мировой уровень и стала конкурентоспособной. В соответствии с этим образовательные проекты «Cadence» реализуют

ТРТУ, МИЭТ, МИФИ и ГУАП, проводятся регулярные семинары и обучение.

В докладе *А. Ю. Дорогова* и *М. Ю. Шестопалова* «Алгоритмы распознавания квантового состояния» рассмотрен метод построения квантовых алгоритмов для распознавания произвольного состояния квантового регистра. Метод основан на мультипликативном разложении комплекснозначных функций. Для выделения мультипликативных компонентов применяются фрактальная фильтрация сигналов. Обсуждается вычислительная эффективность предложенных алгоритмов.

В докладе *В. В. Курейчика* и *П. В. Сороколетова* «Композитные бионические алгоритмы в компоновке блоков» рассмотрена проблема решения задачи компоновки блоков. Для ее решения предложены модифицированные бионические методы и композитный поиск. В докладе приведены основные принципы, ориентированные на решение задач компоновки. Описан композитный бионический алгоритм с параллельной обработкой информации. Его применение дает возможность распараллеливать процесс, эффективно управлять поиском, получать оптимальные и квазиоптимальные решения за полиномиальное время.

В докладе *В. В. Таратухина* о деятельности компании SAP отмечено, что она является ведущим в мире поставщиком программных решений для бизнеса, отвечающих требованиям компаний любого размера — от малых и средних предприятий до глобальных компаний. Решения, входящие в состав mySAP Business Suite и базирующиеся на SAP NetWeaver, помогают предприятиям во всем мире совершенствовать взаимоотношения с клиентами, расширять совместную деятельность с партнерами и повышать эффективность деятельности компаний в рамках логистических цепочек и бизнес-операций. Уникальные ключевые бизнес-процессы различных отраслей, от авиакосмической промышленности до энергетики и коммунального хозяйства, эффективно поддерживаются с помощью 27 отраслевых решений SAP. В настоящее время в более чем 24 450 компаниях, расположенных в более чем 120 странах мира, работает свыше 84 000 инсталлированных систем программного обеспечения SAP. Дочерние компании SAP имеются в более чем 50 странах мира. Компания представлена на нескольких биржах, включая Франкфуртскую и Нью-Йоркскую фондовые биржи, под символом «SAP». В 1992 г. открылось представительство SAP AG в Москве. За прошедшие 12 лет открылись представительства в Санкт-Петербурге, Алматы и Киеве, а численность сотрудников превысила 400 чел. В СНГ и странах Балтии осуществлена 201 продуктивная инсталляция решений SAP. Всего в СНГ и Балтии более 30 тыс. чел. работают с решениями SAP.

В декабре прошлого года компания SAP сообщила о старте глобальной программы партнерства с вузами под названием «Университетский альянс» в России, странах СНГ и Балтии. В рамках этой международной программы SAP предоставляет более чем 500 вузам 32-х стран мира доступ к бизнес-решениям SAP в качестве современных инструментов обучения. Цели программы: помощь в разработке программ высшего бизнес-образования, в которых особое внимание уделяется интегри-

рованным бизнес-процессам; содействие одаренным выпускникам, которые будут использовать решения и технологии SAP на практике; создание университетского сообщества исследователей, которые могут содействовать совершенствованию решений SAP и инновациям в бизнес-процессах; работа с профессиональными и сертификационными организациями для продвижения инноваций в сфере образования; обеспечение достаточной степени интеграции решений SAP в учебный процесс путем предоставления всеобъемлющей поддержки в планировании, внедрении и передаче знаний.

В центре внимания научно-исследовательских инициатив программы «Университетский альянс» будут вопросы повышения конкурентоспособности компаний на основе тех решений SAP, которые в максимальной степени отвечают потребностям клиентов, а также технические инновации, способные обеспечить технологический прорыв, стандарты и процедуры успешного внедрения бизнес-приложений и инновационных процессов. В рамках программы компания SAP планирует проведение семинаров, предоставление учебных материалов, развертывание объединенных глобальных сетей для преподавателей и учащихся, а также создание возможностей для профессионального развития, научных исследований и совместных работ в разных областях деятельности. Программа спонсирует ряд информационных мероприятий в течение года. В ее рамках ежегодно проводятся инновационные конгрессы SAP, которые собирают вместе лучших преподавателей и исследователей для обмена мнениями и опытом в области инноваций, предпринимательства и исследований в области образования. Кроме того, в разных странах мира проводятся так называемые факультетские семинары, на которых педагоги получают практический функциональный опыт SAP, а также методическую помощь. Международная практика показывает, что такого рода семинары оптимально учитывают уникальные требования преподавателей. Научно-исследовательские инициативы с высоким рыночно-коммерческим потенциалом получают дальнейшее развитие в соответствующих организациях SAP, и на их базе разрабатываются новые продукты.

Реализация данной программы дает возможность студентам высших учебных заведений России получить знания в области решений SAP для управления бизнесом. Специалисты в области решений SAP сегодня являются высоковостребованным кадровым ресурсом как в России, так и во всем мире. Из 15 крупнейших российских компаний 13 сегодня используют решения SAP. Знакомство с решениями SAP значительно повышает качество и расширяет практические знания молодых специалистов, а также ускоряет и облегчает их вхождение в бизнес-практику.

Содержательные дискуссии с большим числом участников проходили на заседаниях круглого стола: «Проблемы искусственного интеллекта», ведущие *В. Н. Вагин* и *А. П. Еремеев*; «Эволюционное моделирование и генетические алгоритмы», ведущие *В. М. Курейчик* и *Б. К. Лебедев*; «Интеллектуальные САПР», ведущие *А. П. Рыжов* и *В. А. Камаев*; «Мягкие вычисления», ведущие

Н. Г. Ярушкина и *В. Б. Тарасов*; «Приоритетный национальный проект «Образование», ведущие *В. М. Курейчик* и *А. П. Еремеев*; «Интеллектуальные системы в менеджменте», ведущие *В. Е. Ланкин* и *В. Н. Волкова*.

На пленарных заседаниях состоялись презентации журналов «Новости искусственного интеллекта» (Москва), «Программные продукты и системы» (Тверь), «Известия вузов. Электромеханика» (Новочеркасск), «Известия ТРТУ» (Таганрог), «Перспективные информационные технологии и интеллектуальные системы» (Таганрог), а также следующих монографий участников конференций:

— *Гладков Л. А., Зинченко Л. А., Курейчик В. В.* и др. Оптимизация на основе методов гомеостатики, эволюционного развития и самоорганизации. — Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2006. — 308 с.;

— *Камаев В. А., Бутенко Л. Н., Дворянкин А. М.* и др. Концептуальные проектирование. Развитие и совершенствование методов. — Волгоград;

— *Курейчик В. М., Лебедев Б. К., Лебедев О. Б.* Поисковая адаптация: теория и практика. — М.: ФИЗМАТЛИТ. — 272 с.

Во время работы конференции AIS'06 была проведена школа-семинар по Приоритетному национальному проекту «Образование» под председательством *В. М. Курейчика*. В рамках конференции CAD—2006 работала школа молодых ученых и специалистов по проблемам разработки и применения передовых САПР изделий микроэлектроники, где были заслушаны заказные доклады *В. М. Курейчика* «Генетические алгоритмы»; *В. Н. Вагина* «Логический вывод»; *А. П. Рыжова* «Инструментальные средства Cadence»; *В. Б. Тарасова* «Многоагентные системы».

Труды конференций были опубликованы в четырех сборниках общим объемом 1430 с. 177 докладов на русском языке, а также 9 докладов и аннотации всех докладов на английском языке опубликованы Московским издательством физико-математической литературы. В журнале «Известия ТРТУ. Тематический выпуск "Интеллектуальные САПР"» опубликованы 63 доклада.

В 2007 г. планируется проведение VII Международной научно-технической конференции «Интеллектуальные системы» и XXII Международной научно-технической конференции «Интеллектуальные САПР» (3—10 сентября, Геленджик/Дивноморское). Приглашаем принять участие в работе конференции всех заинтересованных — известных ученых и молодых научных работников, аспирантов и студентов.

*В. М. Курейчик,
В. В. Курейчик,
Е. В. Нужнов*

☎ (8634) 38-34-51

e-mail: kur@tsure.ru,

vkur@tsure.ru,

nev@tsure.ru





CONTENTS & ABSTRACTS

AN ADAPTIVE CONTROL SYSTEM FOR T -PERIODIC NONLINEAR PLANTS 2

Yeremin E. L., Kapitonova M. S.

An adaptive control system for nonlinear periodic scalar plants is synthesized with the help of an implicit reference model and a synthesis method based on hyperstability criterion application. The structure of self-tuning loops for adaptive controller's coefficients is formed using both periodic and integrating blocks.

CONTROLLING AN OBJECT WITH A PRIORI UNDEFINED STATE VECTOR STRUCTURE 8

Pogorelov V. A.

The paper presents a technique enabling precise synthesis of control laws for a stochastic object with undefined state vector structure. The control laws synthesized are optimal subject to nonlinear probability criteria. The advantages of the new technique as against the control based on precise identification of state vector's structure during object's motion are demonstrated. An application example is included.

STRUCTURALLY EQUIVALENT FUNCTIONS IN DISCRETE OPTIMIZATION TASKS 13

Burkov V. N., Burkova I. V., Kolesnikov P. A., Kashenkov A. R.

Network programming techniques is generalized for the case where both the objective function and the constraints have similar network structures. Several discrete optimization cases are studied.

A MODEL OF AN ANALOGY BETWEEN MATHEMATICAL PROOFS 20

Kleschev A. S.

A model of an analogy between proofs is built on the basis of an extendable model of mathematical practice. A source proof is generalized by replacing some its parts with global syntactic variables. The target proof is obtained from the generalization as the result of applying a syntactic substitution instead of global syntactic variables. The tasks of analogy discovery, of building a target proof by analogy, of lemmas generation, which are necessary for building a target proof by analogy as well as for the generation of theorems analogous to a source one, consist in searching such syntactic substitution.

INTELLIGENT MECHANISMS OF INFORMATION WARS 25

Tsyganov V. V., Bukharin S. N., Vasin V. V.

The paper discusses information war mechanisms providing flexible interaction between the propaganda and the persons concerned in the struggle for rivals suppression and capturing their capital and power. An intelligent propaganda mechanism is developed enabling rival suppression in the presence of a complex teachable control subject — a group comprised of an agent of influence and the concerned persons minimizing their risks. Prop-

aganda mechanisms ensuring information dissemination among groups and co-operation of the concerned persons in the organization are considered. A mechanism of informational resistance regulating the interaction of propaganda structures with the persons concerned in the competitive activity for the influence within the organization is developed.

SCENARIO PLANNING AS A TOOL FOR SOLVING ECONOMIC MANAGEMENT PROBLEMS 31

Kononenko A. F., Shevchenko V. V.

A class of a game-theoretical models (operational games) is briefly described enabling effective application of scenario planning. The principles and procedures of its application to gaming simulation of socio-economic processes are discussed. A basic macroeconomic model describing socio-economic development of a of state is offered.

A FINANCIAL PREDICTION MODEL AND HOME INVESTMENT SCENARIOS 37

Dranko O. I.

A mathematical model of financial accounting is presented that enables quick assessment of enterprise's future financial performance and pressure for money (financing requirement). Business efficiency management scenarios are discussed. The indicators calculated on the basis of public accounting data are used as control variables. The results of enterprise operation efficiency improvement in various industries are included.

COMPANY VALUE MANAGEMENT PROBLEM: A DISCRETE CASE 41

Romanov V. S.

The paper describes a mathematical model of company value management from evaluation to calculation of specific projects' influences on the company value. A value maximization problem has been formulated on the basis of the management model. The problem has been analyzed for a discrete case. The paper shows that the common «cost/performance» technique would not deliver correct solutions due to the impossibility to divide the projects and because of synergetic effects between them. Three heuristics (analogous of *PI*, *NPV* and *IRR* criteria) were offered as a means to find solutions. The possibility of their application has been analyzed by means of a numerical experiment.

IDENTIFICATION OF STATISTICAL PROCESS MODELS UNDER INCOMPLETE INFORMATION. 46

Kuznetsov L. A., Korneev A. M., Zhuravlyova M. G.

The possibility of EM algorithm strategy application for building multiple regression models under incomplete process data is examined. The models based on complete data and the data where the missing points were replaced with unconditional and conditional means are compared. An enhanced model describing the relationship between a mechanical characteristic of flat and a set of process parameters is obtained with the help of EM algorithm.

THE PROBLEMS OF ENERGY-EFFICIENT CONTROL OF A SHEET-ROLLING COMPLEX. Part II51**Ghenkin A. L., Kudelin A. R.**

The principles of initial tuning of energy-efficient control system for sheet-rolling «furnaces—flattening-mill» complex and its further adjustment are developed. The system's efficiency for various energy conservation modes is evaluated.

THE AUTOMATED SYSTEM FOR EARLY AND DIFFERENTIAL DIAGNOSTICS OF THE CLINICAL FORMS OF PARKINSON'S DISEASE58**Khutorskaya O. E.**

A system operating on the basis of spectral-statistical treatment of a special signal extracted from the electromyogram (EMG) is described. Quantitative estimates of various EMG parameters underlying the diagnostics are derived. The automated system is applied for statistical treatment of quantitative estimates of various EMG parameters and determination of basic symptomatology of Parkinson's disease.

AN INERTIAL-SATELLITE NAVIGATION CONTROL SYSTEM FOR VEHICLES64**Makarenko V. G., Podorozhnyak A. A., Rudakov S. V., Bogomolov A. V.**

The paper provides theoretical justification of an inertial-satellite navigation control system for vehicles and proves its expediency with simulation results. Along with GPS signals, the system employs a variable dimension inertial strapdown system.

BIFURCATIONAL CHANGES OF POWER COMPANY MANAGEMENT ADEQUACY IN PROCESS OF REFORMS 72**Kleparsky V. G., Kleparskaya E. V.**

The changes in the adequacy of management realized in Russian power companies in process of their transition to free market are examined. A bifurcational change of the standard deviation from the central line of the attraction zone formed by the competitive milieu is detected. Its cause is the qualitative change of management.

A WHOLESAL POWER MARKET MODEL IN POWER COMPANIES' OPERATIONS PLANNING UNDER POWER INDUSTRY REORGANIZATION CONDITIONS 74**Ovsyannikova G. V.**

The necessity of improving power company's pricing procedures under power industry reorganization conditions is demonstrated. The paper suggests to use a wholesale power market model for power company activities planning.

DEVELOPING MECHANISMS FOR OBTAINING FUNDS FOR CULTURAL, SOCIAL, AND EDUCATIONAL PROGRAMS 76**Gladkov M. Yu.**

The paper focuses on the development of endowment and improving its efficiency in cultural, social, and educational programs.

КОНФЕРЕНЦИЯ**"Сложные системы управления и менеджмент качества" — CCSQM'2007****Организаторы — группа ведущих технических вузов Центральной России и Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН**

Место и время проведения — Старооскольский филиал Московского института стали и сплавов (г. Старый Оскол, Белгородская обл., Россия), 12—14 марта 2007 г. Одним из организаторов конференции является кафедра автоматики и промышленной электроники института, которая в этом году отмечает свое 15-летие.

Тематика конференции

- Теория систем
- Идентификация систем
- Теория управления
- Технические средства автоматизированного управления
- Управление качеством
- Системы управления технологическими процессами и предприятиями
- Организация и планирование производства
- Моделирование систем
- Системы с неопределенностью
- Системы с нечеткой логикой
- Системы принятия решений
- Инженерия знаний и системы искусственного интеллекта
- Информационные системы
- Технологии разработки программного обеспечения

☎ (4742) 32-80-44; e-mail: lgtu.asu.conf@mail.ru