

ВЕСТНИК

НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА «ХПИ»

Сборник научных трудов

*Тематический выпуск «Системный анализ,
управление и информационные технологии»* 10'2009

Издание основано Национальным техническим университетом «ХПИ»
в 2001 году

Госиздание

Свидетельство Госкомитета по информационной политике Украины
КВ № 5256 от 2.07.2001 г.

КООРДИНАЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель

Л.Л. Товажнянский, д-р техн. наук, проф.

Зам. председателя

А.П. Марченко, д-р техн. наук, проф.

Е.И. Сокол, д-р техн. наук, проф.

Секретарь координационного совета

К.А. Горбунов, канд. техн. наук, доц.

Е.Е. Александров, д-р техн. наук, проф.

Б.Т. Бойко, д-р техн. наук, проф.

М.Д. Годлевский, д-р техн. наук, проф.

А.И. Грабченко, д-р техн. наук, проф.

В.Г. Данько, д-р техн. наук, проф.

В.Д. Дмитриенко, д-р техн. наук, проф.

П.А. Качанов, д-р техн. наук, проф.

В.Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.

В.И. Кравченко, д-р техн. наук, проф.

А.К. Морачковский, д-р техн. наук, проф.

П.Г. Перерва, д-р техн. наук, проф.

Н.И. Погорелов, д-р техн. наук, проф.

М.И. Рыщенко, д-р техн. наук, проф.

В.Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.

В.П. Себко, д-р техн. наук, проф.

В.И. Таран, д-р физ.-мат. наук, проф.

Ю.В. Тимофеев, д-р техн. наук, проф.

Е.И. Юносова, д-р фил. наук, проф.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Ответственный редактор

М.Д. Годлевский, д-р техн. наук, проф.

Зам. ответственного редактора

А.С. Куценко, д-р техн. наук, проф.

Ответственный секретарь

Н.И. Безменов, канд. техн. наук, доц.

И.П. Гамаюн, д-р техн. наук, проф.

В.Д. Дмитриенко, д-р техн. наук, проф.

А.Е. Ефимов, д-р техн. наук, проф.

И.В. Кононенко, д-р техн. наук, проф.

Л.М. Любчик, д-р техн. наук, проф.

В.П. Северин, д-р техн. наук, проф.

Л.Г. Раскин, д-р техн. наук, проф.

Н.В. Шаронова, д-р техн. наук, проф.

М.А. Ястребенецкий, д-р техн. наук, проф.

АДРЕС РЕДКОЛЛЕГИИ

61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21

Кафедры «Автоматизированные
системы управления» и «Системный
анализ и управление»

Тел. (057) 707-65-20,

(057) 707-61-03

Харьков НТУ «ХПИ» 2009

Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Тематический выпуск «Системный анализ, управление и информационные технологии». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2009. – № 10. – 202 с.

У збірнику представлено теоретичні та практичні результати наукових досліджень та розробок, що виконані викладачами вищої школи, аспірантами, студентами, науковими співробітниками, спеціалістами різних організацій та підприємств.

Для науковців, викладачів, аспірантів, студентів.

В сборнике представлены теоретические и практические результаты научных исследований и разработок, которые выполнены преподавателями высшей школы, аспирантами, студентами, научными сотрудниками, специалистами различных организаций и предприятий.

Для научных работников, преподавателей, аспирантов, студентов.

**Друкується за рішенням Вченої ради НТУ «ХПІ»,
протокол № 4 від 10.04.2009 р.**

Л. М. ЛЮБЧИК, д-р техн. наук, проф., зав. каф. КМММ НТУ «ХПИ»,
Д. В. ДЖУЛГАКОВ, студент НТУ «ХПИ»

СИНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБРАТНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В статті розглядається задача синтезу обернених динамічних моделей та побудови їх мінімальної реалізації у просторі станів. Аналізується взаємозв'язок обернених динамічних моделей і керованих систем з синергетичними законами управління.

В статье рассматривается задача синтеза обратных динамических систем и построения их минимальной реализации в пространстве состояний. Анализируется взаимосвязь обратных динамических моделей и систем, управляемых синергетическими законами управления.

In the paper inverse dynamical systems synthesis and construction of their minimal state-space realizations are considered. The relations of inverse systems and systems driven by synergetic controllers are analyzed.

Введение. Обратные динамические системы находят широкое применение в задачах восстановления входных сигналов динамических систем, компенсации внешних возмущающих воздействий, слежения за заданными траекториями [1]. Отличительной особенностью обратных систем является проекционный характер их динамики, что позволяет рассматривать их поведение как движение по некоторому инвариантному многообразию в пространстве состояний. Задачи синтеза законов управления, обеспечивающих движение по инвариантным многообразиям, относятся к проблемам синергетического управления [2]. Таким образом, представляет интерес анализ динамических свойств многомерных обратных динамических систем с точки зрения синергетического подхода.

Задача синтеза обратных динамических систем. Рассмотрим многомерную линейную стационарную динамическую систему, описываемую моделью в переменных состояния:

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad y = Cx + Du, \quad (1)$$

где $x \in R^n, u \in R^m, y \in R^m$ – вектора состояния, входов и выходов;

$A \in R^{n \times n}, B \in R^{n \times m}, C \in R^{m \times n}, D \in R^{m \times m}$ – матрицы параметров системы.

Введем в рассмотрение матричные параметры Маркова системы (1):

$$S(0) = D, S(\alpha) = CA^{\alpha-1}B, \alpha = \overline{0, n}. \quad (2)$$

Обозначим через α относительный порядок системы, то есть такое минимальное неотрицательное целое число, что $S(\alpha) \neq 0$. Будем

рассматривать только строго реализуемые системы, для которых $D = 0, \alpha > 0$.

Построим обратную динамическую модель системы (1). Рассмотрим последовательные производные выхода:

$$\begin{aligned}\dot{y} &= CAx + CBu = CAx \\ \ddot{y} &= CA^2x + CABu = CA^2x \\ &\dots \\ y^{(\alpha)} &= CA^\alpha x + S(\alpha)u,\end{aligned}\tag{3}$$

и примем уравнение обратной динамической системы в виде:

$$\begin{cases} \dot{x}_I = Fx_I + BS^{-1}(\alpha)y^{(\alpha)} \\ y = S^{-1}(\alpha)CA^\alpha x_I + S^{-1}(\alpha)y^{(\alpha)}; \\ F = A - BS^{-1}(\alpha)CA^\alpha. \end{cases}\tag{4}$$

Действительно, рассмотрим передаточную функцию системы (4):

$$W_I(s) = S^{-1}(\alpha) \cdot s^\alpha - S^{-1}(\alpha)CA(sI_n - F)^{-1}BS^{-1}(\alpha) \cdot s^\alpha.\tag{5}$$

Вычислим резольвенту оператора F , обозначив $R_A = \text{Res } A = (sI_n - A)^{-1}$. Тогда по теореме об обращении суммы матриц [3]:

$$(sI_n - F)^{-1} = (sI_n - A + BS^{-1}(\alpha)CA^\alpha)^{-1} = R_A - R_AB(S(\alpha) + CA^\alpha R_AB)^{-1}CA^\alpha R_A\tag{6}$$

По индукции несложно доказать, что $A^k R_A = s^k R_A - \sum_{i=0}^{k-1} s^{k-i-1} A^i$.

Тогда с учетом того, что $S(i) = 0$ при $i < \alpha$:

$$CA^\alpha R_AB = s^\alpha CR_AB - \sum_{i=0}^{\alpha-1} s^{\alpha-i-1} S(i+1) = s^\alpha W(s) - S(\alpha),\tag{7}$$

где $W(s) = CR_AB$ - передаточная функция исходной системы (1), получаем:

$$(sI_n - F)^{-1} = R_A - s^{-\alpha} R_AB(W(s))^{-1}CA^\alpha R_A;\tag{8}$$

$$\begin{aligned}W_I(s) &= s^\alpha S^{-1}(\alpha) - s^\alpha S^{-1}(\alpha)CA^\alpha R_AB S^{-1}(\alpha) + \\ &+ S^{-1}(\alpha)CA^\alpha R_AB(W(s))^{-1}CA^\alpha R_AB S^{-1}(\alpha) = (W(s))^{-1}.\end{aligned}\tag{9}$$

Таким образом, система (4) действительно является моделью обратной динамической системы для (1).

Рассмотрим характеристический полином обратной динамической системы (4):

$$\Delta_I(s) = |sI_n - F| = \Delta(s) \cdot |I_n + BS^{-1}(\alpha)CA^\alpha R_A| = \Delta(s) \cdot |W(s)| \cdot s^{am} \cdot |S^{-1}(\alpha)|. \quad (10)$$

Полином $\Delta_0(s) = \Delta(s) \cdot |W(s)|$ является полиномом нулей исходной системы (1). Таким образом, получаем известный результат [4] о том, что полюса системы (4) совпадают с нулями исходной системы (1). Кроме того система (4) имеет нулевой полюс кратности am , а потому реализация в пространстве состояний (4) не является минимальной. Действительно:

$$\begin{aligned} CA^k \dot{x}_I(t) &= CA^{k+1} \dot{x}_I(t), \quad k = \overline{0, a-2}; \\ CA^{a-1} \dot{x}_I(t) &= y_I^{(\alpha)}(t). \end{aligned} \quad (11)$$

Для упрощения выкладок предположим выполнение условий согласованности начальных условий для обратной модели:

$$CA^k \dot{x}_I(0) = y_I^{(\alpha)}(0), \quad k = \overline{0, a-1}. \quad (12)$$

Введем обозначения $R(i) = \begin{pmatrix} C & CA & \dots & CA^i \end{pmatrix}^T$, $Y_I^{(i)}(t) = \begin{pmatrix} y_I(t) & \dot{y}_I(t) & \dots & y_I^{(i)}(t) \end{pmatrix}$. Тогда условие согласованности (12) запишется как $R(\alpha-1)x_I(0) = Y_I^{(\alpha-1)}(0)$. Проинтегрировав (11) по времени с учетом условий согласованности начальных условий получим, что движение обратной системы осуществляется по нестационарному инвариантному многообразию в пространстве состояний:

$$\sigma(x_I(t)) = R(\alpha-1)x_I(t) = Y_I^{(\alpha-1)}(t). \quad (13)$$

Таким образом, обратная система не является полностью управляемой [5], а значит, реализация (4) не является минимальной.

Понижение размерности обратных динамических систем. Применим метод расщепления для выделения подсистемы, описывающей движение по многообразию, которая и будет минимальной реализацией обратной системы.

Обозначим для краткости $R = R(\alpha-1)$ и будем считать, что инвариантное многообразие не вырождено, т.е. $\text{rank } R = am$. Разложим пространство состояний системы X в прямую сумму пространств X_1 и X_2 , где X_2 параллельно многообразию (13). Вводя проекционные операторы $P_1 = R^+R$ и $P_2 = I - R^+R$, получим: $X = X_1 \oplus X_2$, $x_2 = P_1 x_I \in X_1$, $x_2 = P_1 x_I \in X_2$, $\sigma = R x_I = R x_1$, $R x_2 = 0$.

Пусть матрица W состоит из линейно независимых столбцов матрицы P_2 . Так как $P_2 R^+ = 0$ и матрица R^+ невырождена, то $\dim \ker P_2 \geq am$. С другой стороны, $\text{rank } R^+ R = am$, $\text{rank } P_2 \geq n - am$. Таким образом, получаем, что $\text{rank } P_2 = n - am$, а, значит, матрица W имеет размеры $n \times (n - am)$. Тогда вектор x_2 можно выразить как $x_2 = W\bar{x}$, $\bar{x} \in R^{n-am}$, то есть выполняется разбиение вектора x_I на вектора σ и $\bar{x}$. Действительно:

$$x_1 = R^+ R x_I = R^+ \sigma, \quad x_2 = W\bar{x}; \quad x_I = R^+ \sigma + W\bar{x} = Q^{-1} \begin{pmatrix} \sigma \\ \bar{x} \end{pmatrix}, \quad Q^{-1} = \begin{bmatrix} R^+ & W \end{bmatrix}. \quad (14)$$

По сути, была выполнена замену переменных с матрицей Q . Учитывая, что $RW = 0$, нетрудно показать, что $Q = \begin{bmatrix} R \\ W^+ \end{bmatrix}$.

Подставим введенное преобразование в уравнение обратной системы (4):

$$\begin{pmatrix} \dot{\sigma} \\ \dot{\bar{x}} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} R \\ W^+ \end{bmatrix} F \begin{bmatrix} R^+ & W \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma \\ \bar{x} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} R \\ W^+ \end{bmatrix} BS^{-1}(\alpha) y_I^{(\alpha)}. \quad (15)$$

Выполняя поблочное умножение получаем:

$$\begin{pmatrix} \dot{\sigma} \\ \dot{\bar{x}} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I_m & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & I_m & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ & W^+ FR^+ & & & W^+ FW \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma \\ \bar{x} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ I_m \\ W^+ BS^{-1}(\alpha) \end{bmatrix} y_I^{(\alpha)}. \quad (16)$$

Из (16), как и ранее, получаем, что $\sigma(t) = Y_I^{(\alpha-1)}(t)$. Рассматривая только компоненту $\bar{x}$, получим искомую минимальную реализацию системы:

$$\dot{\bar{x}} = \bar{F}\bar{x} + \bar{G}Y_I^{(\alpha)}(t), \quad \bar{F} = W^+ FW, \quad \bar{G} = \begin{bmatrix} W^+ FR^+ & W^+ BS^{-1}(\alpha) \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Конкретизируем возможный вид матриц $R, W, \bar{F}, \bar{G}$. Матрица R имеет полный ранг, будем считать, что первые ее am столбцов линейно независимы: $R = \begin{bmatrix} R_1 & R_2 \end{bmatrix}$, $R_1 \in R^{am \times am}$, $\det R_1 \neq 0$. Тогда получаем следующие выражения:

$$R^+ = \begin{bmatrix} R_1^{-1} \\ 0_{(n-cm) \times cm} \end{bmatrix}, \quad W = \begin{bmatrix} -R_1^{-1}R_2 \\ I_{n-cm} \end{bmatrix}, \quad W^+ = \begin{bmatrix} 0_{(n-cm) \times cm} & I_{n-cm} \end{bmatrix},$$

$$Q = \begin{bmatrix} R_1 & R_2 \\ 0_{(n-cm) \times cm} & I_{n-cm} \end{bmatrix}, \quad Q^{-1} = \begin{bmatrix} R_1^{-1} & -R_1^{-1}R_2 \\ 0_{(n-cm) \times cm} & I_{n-cm} \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Вводя блочное разбиение исходных матриц $F = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ F_{21} & F_{22} \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}$,

можно записать: $\bar{F} = F_{22} - R_1^{-1}R_2F_{21}$, $\bar{G} = \begin{bmatrix} F_{21}R_1^{-1} & B_2S^{-1}(\alpha) \end{bmatrix}$.

Анализ динамики обратных систем с точки зрения движения по многообразиям. Рассмотрим для сравнения синтез синергетического закона управления для линейной системы

$$\dot{x} = Ax + Bu. \quad (19)$$

Будем искать управление u , которое обеспечивало бы движение системы (19) по линейному многообразию

$$\sigma(x) = Sx = k, \quad k \in R^m, \quad k = const \quad (20)$$

при условии $|SB| \neq 0$. Такой закон управления называют эквивалентным. Необходимым условием движения системы по многообразию (20) является

$$\dot{\sigma}(x) = \left(\frac{d}{dx} \sigma(x) \right)^T \dot{x} = S\dot{x} = SAx + SBu_{eq} = 0. \quad (21)$$

Поэтому получаем эквивалентный закон управления в следующем виде:

$$u_{eq} = -(SB)^{-1}SAx. \quad (22)$$

Тогда уравнение замкнутой системы будет иметь вид

$$\dot{x} = (A - B(SB)^{-1}SA)x. \quad (23)$$

Заметим, что матрицу замкнутой системы можно представить в виде PA , где $P = I - B(SB)^{-1}S$ – проекционный оператор. Найдем характеристический полином системы (23): $\Delta_s(s) = |sI_n - A + B(SB)^{-1}SA| = \Delta(s)|I_n + B(SB)^{-1}SAR_A| = \Delta(s)|I_m + SAR_AB(SB)^{-1}| = \Delta(s) \cdot s^m \cdot |W(s)| \cdot |(SB)^{-1}|$, где $\Delta(s) = |sI_n - A|$, $R_A = (sI_n - A)^{-1}$, $W(s) = SAR_AB$. Поскольку $W(s)$ является передаточной функцией системы

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad \sigma = Sx, \quad (24)$$

а $\Delta_0(s) = \Delta(s) \cdot |W(s)|$ – полиномом нулей системы, то набор полюсов системы (23) состоит из $(n - m)$ нулей системы (24) и нулевого полюса кратности m .

Также как и для обратных систем, проведем расщепление пространства состояний $x = x_1 + x_2 = P_1x + P_2x$, $P_1 = S^+S$, $P_2 = I_n - S^+S$, $\sigma = Sx_1$, $Sx_2 = 0$.

Пусть матрица W состоит из линейно независимых столбцов матрицы P_2 . Аналогично получаем, что $W \in R^{n \times (n-m)}$. Нетрудно показать, что выполняются тождества $SW = 0$, $W^+B = 0$. Тогда можно сделать замену:

$$\begin{aligned} x_1 &= S^+\sigma, \quad x_2 = Wz, \quad z \in R^{n-m}; \\ x &= \begin{bmatrix} S^+ & W \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma \\ z \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \sigma \\ z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} S \\ W^+ \end{bmatrix} x. \end{aligned} \quad (25)$$

Подставляя замену (25) в систему (23) получим:

$$\dot{z} = W^+AWz + W^+AS^+k, \quad \dot{\sigma} = 0. \quad (26)$$

Система пониженного порядка (26) описывает поведение замкнутой системы (23) на инвариантном многообразии (20). Одинаковый вид уравнений (26) и (17), (23) и (13) позволяет трактовать движение обратной системы как движение по изменяющемуся во времени многообразию $\sigma(x_I(t)) = Rx_I(t) = Y_I^{(\alpha-1)}(t)$.

Выводы. В работе рассмотрены проекционные свойства динамики обратных динамических моделей произвольного порядка. Это позволило выделить инвариантное многообразие в пространстве состояний обратной системы, зависящее от входных сигналов, и построить минимальную реализацию системы. Кроме того, была продемонстрирована близость обратных динамических систем и замкнутых системы, управляемых эквивалентным синергетическим законом управления. Такая синергетическая трактовка обратных систем позволит использовать методы синергетического управления в задачах синтеза обратных динамических моделей.

Список литературы: 1. Костенко Ю. Т., Любчик Л. М. Системы управления с динамическими моделями. – Х.: Основа, 1996. – 212 с. 2. Современная прикладная теория управления: Синергетический подход в теории управления. Ч. II / Под. ред. А. А. Колесникова. – Москва–Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – 555 с. 3. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц. – М.: Наука, 1967. – 576 с. 4. Levy S., Sivan. R. On the stability of zero-output systems.// IEEE Trans. Automat. Control. – 1966. – № 11. – с. 315-316. 5. Позняк А. С. Основы робастного управления (H[∞]-теория). – М.: МФТИ, 1991. – 128 с.

Поступила в редакцию 05.02.09

СЕЙЕД МОДЖТАБА ДЖАФАРИ ХЕНДЖАНИ, аспирант НТУ «ХПИ»,
В. П. СЕВЕРИН, д-р техн. наук, профессор НТУ «ХПИ»

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ УРОВНЕМ ВОДЫ В ПАРОГЕНЕРАТОРАХ АЭС С РЕАКТОРАМИ ВВЭР-1000

В статті розглядаються задачі управління парогенератором в нормальному режимі роботи, і наводиться математичне моделювання систем автоматичного управління рівнем води в парогенераторі з різними типами регуляторів. Розроблені лінійні й нелінійні моделі систем, і приведені результати оптимізації прямих показників якості систем управління рівнем води в парогенераторі.

В статье рассматриваются задачи управления парогенератором в нормальном режиме работы, и приводится математическое моделирование систем автоматического управления уровнем воды в парогенераторе с различными типами регуляторов. Разработаны линейные и нелинейные модели систем, и приведены результаты оптимизации прямых показателей качества систем управления уровнем воды в парогенераторе.

The tasks of steam generator control are considered in the article, related to the normal duty, and the mathematical design of the automatic control of steam generator water level is conducted with the different types of regulators. The linear and nonlinear models of steam generator are developed and the results of direct indexes quality optimization of the water level control systems of steam generator are resulted.

Введение. К настоящему времени существенно изменились схемные решения АЭС с реакторами ВВЭР-1000, конструкция оборудования которых существенно отличается от серийных блоков отечественных АЭС. Выполнение новых проектов невозможно без серьезного расчетного анализа технологических параметров основного и вспомогательного оборудования с учетом систем автоматического управления (САУ). В этой связи в последнее время уделяется много внимания разработке математической модели энергоблока, которая охватывает все основное оборудование, парогенератор (ПГ) ПГВ-1000 и его регуляторы. Создание динамической модели расчета технологических параметров ПГ позволяет проверить принятые решения по тепловой схеме и конструкции установки, изучить свойства ПГ как объекта управления и отработать оптимальные алгоритмы управления в нормальных режимах. Для улучшения динамических свойств САУ реакторной установки предлагается оптимизировать прямые показатели качества (ППК) САУ — перерегулирование, показатель колебательности и время регулирования.

В моделях ПГВ-1000 учитывают системы дифференциальных уравнений (СДУ) материального и теплового балансов, дифференциальное уравнение (ДУ) циркуляции [1, 2]. Добавляя к объектам регулирования ДУ регуляторов, получают модели САУ уровнем (САУУ) [2, 3]. Модели САУ для

оптимизации ППК должны быть простыми, поскольку они многократно используются методами оптимизации при вычислении целевой функции [3]. Алгоритмы вычисления ППК САУ рассмотрены в [4], алгоритмы векторных методов оптимизации САУ с учетом условий устойчивости приведены в [5].

Цель статьи состоит в математическом моделировании САУ реакторной установки ВВЭР-1000 и оптимизации ее ППК. Проводится идентификация САУ по экспериментальным данным [6] и оптимизация ее ППК.

Математическое моделирование систем стабилизации уровня. Технологическую систему питания ПГ обеспечивают системы управления уровнем воды в ПГ и производительностью. САУ включает в себя ПГ, датчик уровня, датчики расходов питательной воды и пара, регулятор уровня (РУ) и регулирующий питательный клапан (РПК). Важнейшей задачей управления ПГ является стабилизация уровня воды в нем при нагрузках 10–110% номинальной, которая выполняется САУ. В соответствии с требованиями технического задания к РУ в стационарных режимах работы отклонение уровня не должно превышать 5 см, а в динамических режимах это отклонение должно быть не более 15 см.

Обоснованы допущения моделирования ПГ. На основании уравнений теплового баланса получена модель процесса теплопередачи от теплоносителя к воде. По уравнениям материального и теплового балансов рабочей среды в ПГ разработана модель процесса парообразования. По закону сохранения количества движения рабочей среды в циркуляционном контуре ПГ получено уравнение циркуляции. Модели главного парового коллектора (ГПК), привода клапана регулирования турбины (КРТ) и исполнительного механизма РПК приняты в виде дифференциальных уравнений первого порядка. Модель ПГ как объекта управления имеет вид:

$$dX_G/dt = A_G X_G + B_{Gq} q + B_{Gw} u + B_{Gs} u_s, \quad \xi_c = C_G X_G, \quad (1)$$

где вектор X_G состоит из координат средних температур теплоносителя и металла теплообменных трубок, объема воды в ПГ, давлений рабочей среды в ПГ и пара в ГПК, уровня воды и расхода пара через зеркало испарения, перемещений РПК и КРТ; q — координата мощности теплоносителя; u и u_s — управляющие воздействия на РПК и КРТ; ξ_c — координата уровня воды, при $\xi_c = 1$ отклонение уровня $\Delta H = 15$ см; A_G , B_{Gq} , B_{Gw} , B_{Gs} , C_G — матрица и векторы параметров модели ПГ.

Пропорциональный (П), интегральный (И) и дифференциальный (Д) регуляторы формируют по ошибке ε управляющее воздействие u на объект управления согласно уравнениям:

$$u_p = K_p \varepsilon; \quad du_i/dt = \lambda_i \varepsilon; \quad dv_D/dt = -\lambda_D (v_D + 10\varepsilon), \quad u_D = v_D + 10\varepsilon, \quad (2)$$

где K_p , λ_I , λ_D — параметры регуляторов. На вход САУУ подается уставка уровня ξ_{cs} , выходом является ξ_c . На регулятор уровня поступает ошибка $\varepsilon = \xi_{cs} - \xi_c + g_s - g_w$, где g_s и g_w — координаты расходов пара и воды. Выражая эти координаты через переменные состояния ПГ, получим ошибку $\varepsilon = \xi_{cs} - D_G X_G$, где D_G — постоянный вектор. Возмущающими воздействиями являются координата тепловой мощности q и действие на КРТ u_s . Регулятор формирует воздействие u , которое подается в модель ПГ и изменяет вектор его состояния X_G . По модели ПГ (1) и уравнениям регуляторов (2) построены модели систем управления уровнем с различными типами регуляторов вида:

$$dX_L/dt = A_L X_L + B_{Lc} \xi_{cs} + B_{Lq} q + B_{Ls} u_s, \quad \xi_c = C_L X_L. \quad (3)$$

Порядок n модели (3) для П регулятора равен порядку модели ПГ $n=9$, для И, Д, ПИ и ПД регуляторов $n=10$, для ИД и ПИД регуляторов $n=11$.

Для модели системы управления уровнем с ПИ регулятором

$$X_L = \begin{pmatrix} X_G \\ u_I \end{pmatrix}, \quad A_L = \begin{pmatrix} A_G - B_{Gw} K_p D_G & B_{Gw} \\ -\lambda_I D_G & 0 \end{pmatrix},$$

$$B_{Lc} = \begin{pmatrix} B_{Gw} K_p \\ \lambda_I \end{pmatrix}, \quad B_{Lq} = \begin{pmatrix} B_{Gq} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad B_{Ls} = \begin{pmatrix} B_{Gs} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad C_L = (C_G \quad 0),$$

где K_p и λ_I — переменные параметры регулятора уровня.

Идентификация параметров системы стабилизации уровня. Решена задача идентификации параметров для модели системы управления уровнем ПГВ-1000 по экспериментальным данным процессов отклонения уровня с отключенным и включенным регулятором уровня. Для этого сформирован вектор ξ относительных переменных $\xi_i = (x_i - x_i^{(0)})/x_i^{(0)}$, $i = \overline{1, 34}$, где x_i — переменные параметры, $x_i^{(0)}$ — ненулевые элементы матриц модели (3), вычисленные по конструктивным и технологическим параметрам ПГВ-1000. По вектору ξ сформирована векторная целевая функция (ВЦФ) задачи идентификации, включающая функцию невязки теоретических процессов отклонения уровня от экспериментальных процессов по 140 точкам. Комбинированным применением векторных методов Вейля, Хука-Дживса и Нелдера-Мида вычислены значения параметров моделей ПГ и его системы управления. На рис. 1, 2 представлены процессы отклонения уровня воды в ПГ для возмущения $u_s = -0,25$ при отключенном и включенном регуляторе: точками обозначены экспериментальные данные, $d=0$ обозначает процессы

при начальных значениях переменных параметров моделей ПГ, остальные процессы получены оптимизацией векторной функции при различных значениях d . При начальных значениях переменных параметров моделей и отключенном регуляторе уровень быстро неограниченно понижается (рис. 1), а при включенном регуляторе процесс изменения уровня неустойчивый колебательный (рис. 2). При $d = 0,25$ процессы в моделях и экспериментальные процессы существенно отличаются. При $d = 0,5$ и отключенном регуляторе процесс в модели ПГ хорошо совпадает с экспериментальным процессом (рис. 1), но при включенном регуляторе процесс в модели не отражает колебательного характера экспериментального процесса (рис. 2). При $d = 0,75$ и $d = 1$ наблюдается лучшее совпадение процессов в моделях с экспериментальными процессами, обеспечивающее среднеквадратичное отклонение менее 1 % (рис. 1, рис. 2). Для дальнейшего исследования системы управления уровнем принята ее модель, соответствующая результатам идентификации с $d = 0,75$. Анализ процессов изменения состояния системы показал, что переменные уровня и РПК имеют большую степень колебательности.

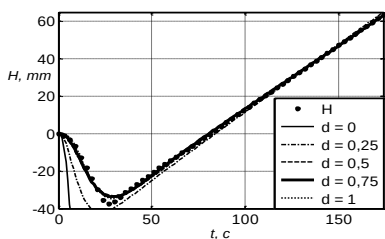


Рис. 1. Отклонение уровня без РУ

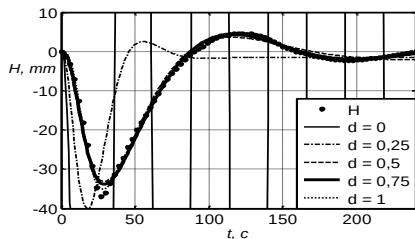


Рис. 2. Отклонение уровня с РУ

Оптимизация прямых показателей качества. Для получения оптимальных процессов отклонения уровня без колебаний с минимальным временем регулирования при возмущении $u_s = 1$ заданы ограничения критериев задачи оптимизации: соответствующее допустимому приращению уровня $h_c = 15$ см значение максимального отклонения координаты уровня $\sigma_m = 1$, соответствующее процессам без колебаний допустимое значение размаха колебаний $\zeta_m = 0$, параметр зоны установления уровня $\delta_z = 0,05$, предельное время процесса $T_f = 500$ с. Сформированы вектор x из переменных параметров регулятора K_p , λ_I , λ_D , ППК — перерегулирование $\sigma(x)$, размах колебаний $\zeta(x)$, время регулирования $t_c(x)$ и его

относительная величина $\tau(x) = t_c(x)/T_f$. Для реализации пошагового принципа оптимизации САУ по областям уровней сформирована ВЦФ

$$F(x) = \begin{cases} (0; P(x)), & x \in H_0; \\ (k; -\rho_{k+1}(x)), & x \in H_k, \quad k = \overline{1, n-2}; \\ (n-1; \sigma(x) - \sigma_m), & x \in H_{n-1}; \\ (n; \zeta(x) - \zeta_m), & x \in H_n; \\ (n+2; \tau(x)), & x \in H_{n+1}, \end{cases}$$

где $P(x)$ — штрафная функция, $\rho_k(x)$ — элементы первого столбца таблицы Рауса, H_k — области уровней. Первая составляющая этой функции — функция уровня $F_1(x)$ имеет приоритет и является счетчиком выполненных ограничений, а вторая — функция штрафа $F_2(x)$ определяет штраф за невыполнение первого нарушенного ограничения. Для различных регуляторов получены оптимальные значения параметров K_p^* , λ_I^* , λ_D^* , проекций векторной функции F_1^* , F_2^* и времени регулирования t_c^* . На рис. 3 представлены переходные процессы изменения уровня ПГ при различных РУ.

Таблица 1

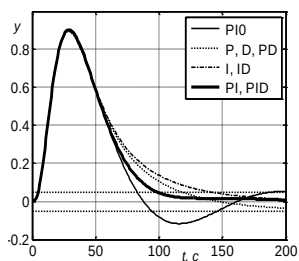


Рис. 3. Изменение уровня воды

Оптимизация параметров РУ

РУ	K_p^*	λ_I^*	λ_D^*	F_1^*	F_2^*	t_c^* , с
П	20,5	—	—	11	0,235	118
И	—	5,34	—	12	0,280	140
Д	—	—	95,0	12	1,051	526
ПИ	2,55	0,14	—	12	0,197	98
ПД	20,5	—	100,0	12	0,235	118
ИД	—	9,67	100,0	13	0,281	140
ПИД	2,55	0,14	100,0	13	0,197	98

Процесс с обозначением П10 отвечает ПИ регулятору с идентифицированными значениями параметров. Остальные процессы отвечают регуляторам с оптимальными значениями параметров из табл. 1.

Рис. 4, 5 отображают лучшие точки процесса оптимизации параметров ПИ регулятора с вектором варьируемых параметров $x = (K_p, \lambda_I)$. В начальной точке, взятой из решения задачи идентификации, из двенадцати ограничений задачи оптимизации не выполняется только одно последнее ограничение показателя размаха колебаний (рис. 4). По сравнению с

начальной точкой в конечной точке помимо исчезновения колебательности время регулирования уменьшилось в 2,1 раза.

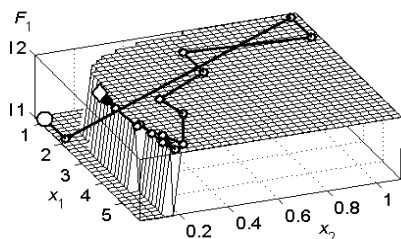


Рис. 4. Оптимизация САУУ на F_1

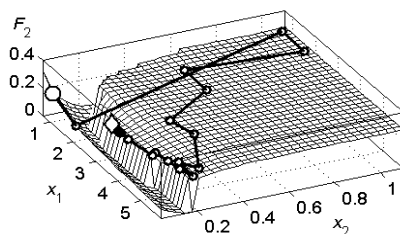


Рис. 5. Оптимизация САУУ на F_2

Сопоставление процессов в оптимальной системе управления уровнем с процессами в ней до оптимизации показало, что помимо исчезновения колебаний координаты уровня исчезли перерегулирование и колебания координаты объема воды, уменьшились колебания разности расходов воды и пара, снизились максимальное отклонение и колебания ошибки, практически исчезли перерегулирование и колебания координаты РПК.

Выводы. Из проведенных исследований вытекают следующие выводы.

1. Для оптимизации параметров регуляторов уровня воды в парогенераторе ПГВ-1000 разработаны математические модели систем управления с различными регуляторами.

2. По экспериментальным данным процессов отклонения уровня воды в парогенераторе идентифицированы параметры системы управления уровнем.

3. Результаты оптимизации показателей качества для систем управления ПГВ-1000 с различными регуляторами позволяют сделать вывод, что самым эффективным типом регулятора уровня является ПИ регулятор с оптимальными значениями параметров, который обеспечивает наиболее быстрый переходный процесс без колебаний.

Список литературы: 1. Денисов В. П., Драгунов Ю. Г. Реакторные установки ВВЭР для атомных электростанций. – М.: ИздАТ, 2002. – 480 с. 2. Иванов В. А. Регулирование энергоблоков. – Л.: Машиностроение, 1982. – 311 с. 3. Шифрин М. Ш. Автоматическое регулирование судовых паросиловых установок. – Л.: Судпромгиз, 1963. – 587 с. 4. Северин В. П., Никулина Е. Н. Алгоритмы вычисления прямых показателей качества функций веса систем автоматического управления // Радиоэлектроника и информатика. – 2004. – № 1. – С. 52-59. 5. Северин В. П. Векторная оптимизация интегральных квадратичных оценок систем автоматического управления // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2005. – № 2. – С. 52-61. 6. Павлыш О. М., Реуков Ю. М. Динамические характеристики парогенераторов энергоблока с реактором ВВЭР-1000 как объекта регулирования уровня // Электрические станции. – 1986. – №2. – С. 9-11.

Поступила в редколлегию 23.03.09

Д.Л. ОРЛОВСКИЙ, канд. техн. наук, доцент НТУ «ХПИ»,
Е.С. ВЫБОРНОВА, студентка НТУ «ХПИ»

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ СИТУАЦИОННОМ УПРАВЛЕНИИ ПРОЦЕССАМИ ЦЕНООБРАЗОВАНИЯ КОММЕРЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

У даній статті розглядаються питання інформаційної підтримки прийняття рішень при ситуаційному управлінні процесами ціноутворення комерційного підприємства, зокрема питання підтримки процесу формування та обґрунтування системи цін та знижок.

В данной статье рассматриваются вопросы информационной поддержки принятия решений при ситуационном управлении процессами ценообразования коммерческого предприятия, в частности вопросы поддержки процесса формирования и обоснования системы цен и скидок.

Введение. Широкая информатизация всех сфер жизнедеятельности общества принципиально изменяет роль информации и информационных технологий в социальном и экономическом развитии страны. Информационные технологии в сфере маркетинга интенсивно развиваются, поскольку автоматизация информационных процессов в этой области в условиях развития рыночных отношений является стратегическим фактором конкурентного преимущества.

Торговля и ценообразование являются лидерами по освоению информационных технологий, поэтому необходимы инструменты, создающие серьезные конкурентные преимущества. Одним из таких инструментов и являются информационные технологии. Эффективность торговой деятельности предприятия и работы предприятия в целом во многом определяется разумной политикой ценообразования [1].

Ситуационный подход к управлению ценообразованием. Ситуационный подход внес большой вклад в теорию управления, используя возможности прямого приложения науки к конкретным ситуациям и условиям. Центральным моментом ситуационного подхода является ситуация, то есть конкретный набор обстоятельств, которые оказывают влияние на организацию в данное время [2]. Одно из направлений разрешения проблемных ситуаций в экономической сфере – ценовая политика организации, процессы ценообразования и возможность использования методов стимулирования, не только для привлечения, но и для удержания старых клиентов. Одним из наиболее существенных факторов, которые определяют эффективность деятельности предприятия, является ценовая политика на товарных рынках. Цены обеспечивают предприятию запланированную прибыль, конкурентоспособность продукции, спрос на нее. Обоснованное и согласованное с потребностями клиентов к качеству товара и

цены на него общее предложение предприятия становится основой его успеха в условиях конкурентного рынка. С учетом этого требования предлагается подход к реализации ситуационного механизма принятия решения в зависимости от уровня цены на товар.

Процедура решения поставленной задачи предполагает выполнение четкой последовательности действий. Сначала выбирается товар, для которого будет рассчитываться рекомендуемая цена. Далее для выбранной цены может назначаться вид скидки. Расчет цены на основе балльной оценки предполагает анализ цен товаров конкурентов и оценку их качества, сбор данных о ценах конкурентов, исследование технико-экономических характеристик товаров конкурентов, сопоставимость анализируемого товара с товарами конкурентов, расчет цены анализируемого товара балльным методом и сравнение действующей цены на товар с ценой, рассчитанной балльным методом [3]. Оценка цены по балльному методу состоит в том, что на основе экспертных оценок значимости параметров изделий для потребителей каждому параметру присваивается определенное число баллов, суммирование которых дает своего рода интегральную оценку технико-экономического уровня изделия [4]. Умножением суммы баллов по новому виду продукции на стоимостную оценку одного балла определяется общая ориентировочная оценка нового изделия:

$$P = \frac{\text{базовая_цена_аналога}}{\sum (\text{коэффициент_весомости} * \text{количество_баллов})} * 100. \quad (1)$$

Также необходимо рассчитать точку безубыточности:

$$N = \frac{FC}{P_g - VC}, \quad (2)$$

где N – точка безубыточности;

FC – постоянные издержки;

VC – переменные издержки;

P_g – варианты цен товара.

Кроме того, необходимо сделать оценку спроса на определенный период. Использование разных прогнозных моделей и сопоставление полученных результатов позволяет повысить достоверность прогнозирования.

Выполнив данную последовательность действий, можно дать обоснование базовой цены и скидки. У каждого значения цены есть свое допустимое отклонение – верхняя и нижняя допустимая граница. «Коридор» цен устанавливается для устранения нестабильности цен продажи товаров или услуг [5]. Установив такой «коридор», можно считать, что, если новая расчетная цена попадает в установленный «коридор», то менять уже назначенное значение цены продажи не имеет смысла, и последующая

продажа товара осуществляется по старой цене. Если же определенная цена не попадает в значение ограничений, то необходимо вернуться на этап обоснования выбора вида цены и скидки, и определения ее базового значения. Далее выполняется определение значения цены на выбранный товар с учетом вида цены, скидки и их предельных ограничений. Для найденного значения цены товара рассчитывается уровень рентабельности. Показатель рентабельности оценивает эффективность производства и расходов на него. На завершающем этапе устанавливаем окончательную цену с учетом возможных скидок при условии допустимого уровня рентабельности, или же возвращаемся на этап выбора вида цены.

Объем продаж со скидками, чтобы сумма операционной прибыли компании не изменилась, можно представить математически формулой (3):

$$V_s = \frac{C_1 - C_0}{C_2 - C_0} * V_A, \quad (3)$$

где V_A – объем продаж до предоставления скидок;

C_0 – все прямые издержки на продажу единицы товара;

C_1 – цена без скидки (старая цена);

C_2 – цена со скидкой (новая цена, меньшая C_1);

V_s – желаемый объем продаж.

«Прямая прибыльность» товара – эта прибыльность меньше маржинальной и больше операционной, в ее расчете учитываются только прямые издержки.

$$\lambda = \frac{C_1 - C_0}{C_1} * 100\%, \quad (4)$$

где – λ -прямая прибыльность.

Если скидка при продаже составит δ_c процентов от начальной цены

$$\delta_c = \frac{C_1 - C_2}{C_1} * 100\%, \quad (5)$$

то процент p требуемого увеличения объема продаж для получения неизменного объема прибыли можно рассчитать, исходя из формулы (3):

$$p = \frac{\delta_c}{\lambda - \delta_c} * 100\%. \quad (6)$$

Используя формулу (6), можно сформировать аналитическую таблицу, которая будет показывать процент p для различных значений прибыльности и скидки. На пересечении колонки прибыльности и строки скидки, находится

объем продаж, необходимый для получения неизменной прибыли. Использование такой таблицы может существенно облегчить процедуру принятия решений, в частности, при формировании системы скидок.

Современные технологии организации и управления продажами предусматривают деление цикла работы с клиентами на последовательные этапы. «Воронка продаж» – удобный и эффективный инструмент моделирования и управления процессом продаж, позволяющий прогнозировать, контролировать и анализировать основные этапы в коммуникациях с клиентом.

Для каждого предприятия, в зависимости от специфики его деятельности этапы индивидуальны. Основные этапы построения «воронки продаж» приведены на рис. 1. В работе рассматривается деятельность коммерческого предприятия, которое специализируется в сфере оптовой и розничной торговли автомобильными запчастями. Представленная «воронка продаж» в целом соответствует особенностям его работы.

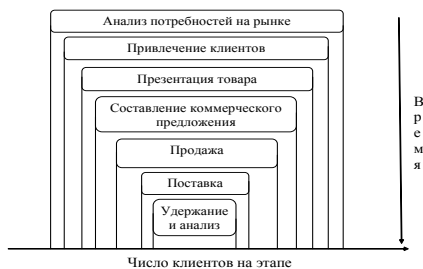


Рис. 1. Графическое представление «Воронки продаж»

Постановка задачи. В последние десятилетия рынок становится все более перенасыщенным товарами и услугами. Потому пришло время борьбы за покупателя. Именно поэтому предприятия применяют методы стимулирования не только для привлечения, но и для удержания старых клиентов [6]. Перед всеми коммерческими и многими некоммерческими организациями как одна из основных встает проблема определения цены товара. В условиях рынка ценообразование представляет сложный процесс, который зависит от многих факторов.

Эффективное решение комплекса задач ценообразования в современных условиях невозможно без использования информационных технологий. Это обусловлено необходимостью:

- быстро получать точные данные,
- обрабатывать большие объемы информации,
- применять сложные алгоритмы расчета;
- классификации и четкого определения ситуации, которая возникает в организации;

- использования накопленного опыта и его передачи.

Полученные данные могут быть использованы при обосновании таких управленческих решений как:

- снижение издержек;
- определение системы цен;
- увеличение числа скидок;
- снижение цены, исходя из цен конкурентов;
- снижение (повышение) цены, исходя из уровня рентабельности.

Разработка информационного и программного обеспечения для решения задачи информационной поддержки процессов управления ценообразованием. Информационные системы и информационные технологии оказывают значительное влияние на ведение бизнеса. Сегодня практически невозможно представить себе эффективную работу специалистов современной фирмы без автоматизированных систем управления. Управление информацией с помощью информационных технологий и использование информационных систем стало одним из наиболее важных элементов эффективного управления и маркетинга. Введение информационных технологий является сложным процессом, сопровождающимся большим риском, издержками и проблемами, связанными с их функционированием [7].

Для автоматизации решения задачи было разработано прикладное программное обеспечение, с его помощью можно работать с данными, которые хранятся в базе данных, рассчитывать рекомендуемую цену товаров на основе балльной оценки, определять объем продаж товаров, соответствующий точке безубыточности и осуществлять оценку спроса на определенный период с учетом рассчитанной цены. Упрощенная структура разработанного программного обеспечения представлена на рис. 2.

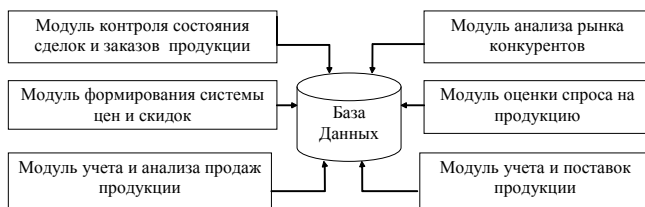


Рис. 2. Структура прикладного программного обеспечения

Ключевым компонентом прикладного программного обеспечения является база данных. Модель данных иллюстрирующая структуру объектов базы данных и взаимосвязи между ними приведена на рис. 3. Для реализации базы данных была выбрана СУБД Microsoft SQL Server 2005.

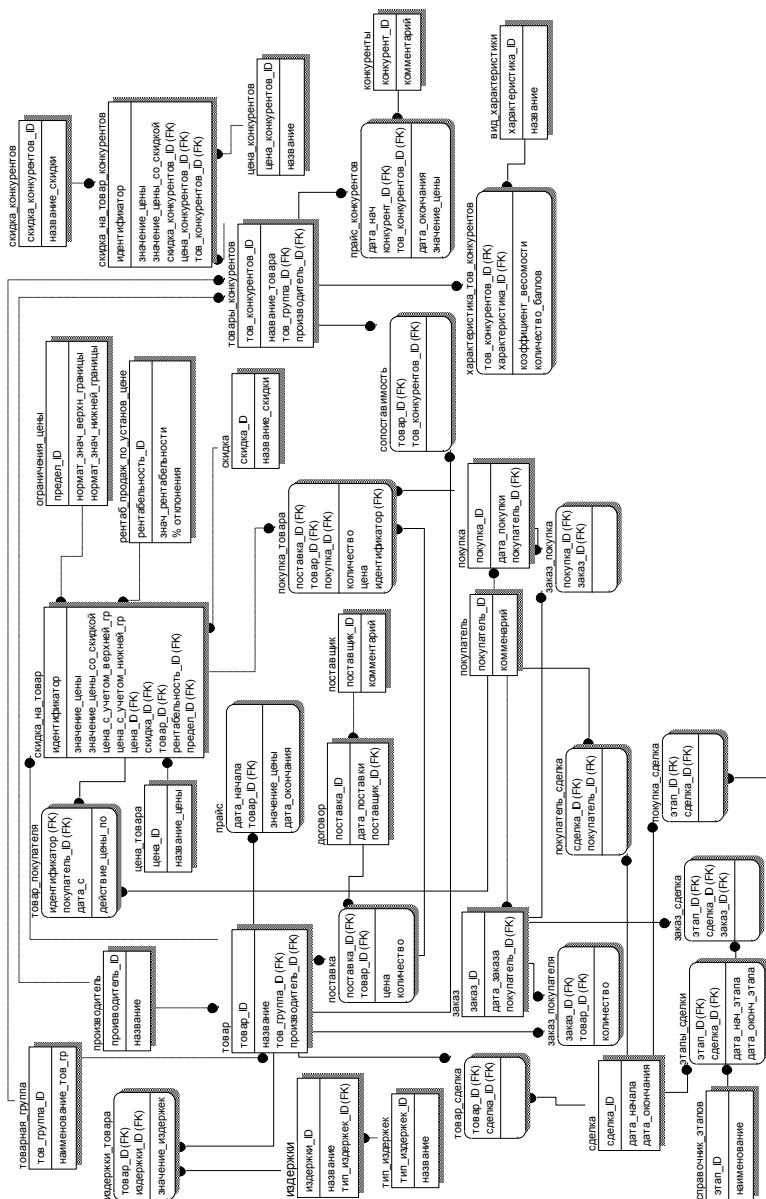


Рис. 3. Модель данных

Расчет цены и прогнозного объема спроса носит рекомендательный характер, являясь исходными данными для процесса принятия решения.

Получаемая информация в таком виде предлагается сотрудникам, занимающимся аналитической работой, которые используют эту информацию при принятии решений.

Проведение контрольных расчетов и анализ полученных результатов. В работе рассматривается предприятие, которое специализируется в сфере оптовой и розничной торговли автомобильными запчастями (фильтрами очистки масла, топлива и воздуха). Сегмент рынка, в котором работает предприятие, характеризуется высоким уровнем конкурентоспособности, потому актуальными являются подходы, связанные с выбором цен и их обоснованием. В качестве исходных данных для контрольных расчетов были использованы данные по продаже фильтра очистки масла PUROLATOR L17200:

Исходные данные

Месяц	март	апрель	май	июнь	июль	август
Количество (шт.)	3700	1135	4492	2583	6203	2641
Месяц	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	январь	февраль
Количество (шт.)	294	1347	292	548	770	854

При расчетах были получены следующие результаты:

- оценка цены по балльному методу, пользуясь формулой (1):

в качестве аналога взят масляный фильтр C117/606 производителя Champion

$$P = \frac{40}{\sum_{i=1}^n (1 * 50 + 1 * 30 + 2 * 50 + 0,5 * 40 + 1 * 30)} * 100 = 16 \text{ грн};$$

- расчет точки безубыточности, исходя из формулы (2):

$$N = \frac{2500}{16 - 12} = 625 \text{ шт};$$

- оценка спроса (графическая интерпретация представлена на рисунке 4). При оценке спроса были использованы функции такого вида: логарифмическая (А), гиперболическая (Б), линейная (В), степенная (Д).

При формировании и обосновании системы скидок был применен подход, базирующийся на использовании формулы (6). На основании результатов расчетов была сформирована аналитическая таблица, отражающая необходимый объем продаж для получения неизменного объема прибыли при увеличении / уменьшении скидки на товар и / или исходной прямой прибыльности. Использование такой таблицы позволило ускорить процесс принятия решений и улучшило качество принимаемых решений.

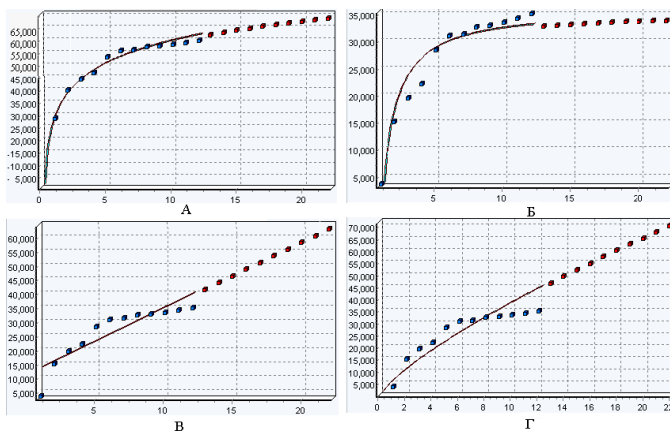


Рис. 4. Оценка спроса

Проведенные расчеты показали работоспособность разработанного прикладного программного обеспечения, а также возможность использования предлагаемого подхода при решении задач ценообразования в коммерческих предприятиях.

Заключение. В результате проведенных исследований были изучены основные особенности решения задач ситуационного управления процессами ценообразования в коммерческих предприятиях. Показано, что для решения этих задач могут быть использованы подходы, ориентированные на конкурентов. Разработано информационное и программное обеспечение для решения задачи ситуационного управления процессами ценообразования. Выполнены контрольные расчеты на основе данных, приближенных к реальным.

Список литературы: 1. Нэгл Т. Т. Стратегия и тактика ценообразования. – СПб.: Питер, 2004. 2. Василенко В.А., Шостка В.И. Ситуаційний менеджмент. – К.: ЦУЛ, 2003. 3. Выборнова Е. С. Об одном подходе к решению задачи обоснования цены на продукцию в коммерческом предприятии // Современные проблемы гуманизации и гармонизации управления. Материалы 7-й Международной междисциплинарной научно-практической школы-конференции –Харьков, 2007. – С. 86-87. 4. Константинов Р. В. Математическое моделирование динамической игры в задаче конкуренции предприятий // Кибернетика и системный анализ – 2004. – № 5. – С. 108-115. 5. Лилова Р. Границы цен // Вісник Тернопільської академії народного господарства – 2000. – № 17. – С. 149-153. 6. . Майборода О. О. Стимулювання продажу товарів // Маркетинг в Україні. – 2001. – № 2. – С. 20-21. 7. Майоров С. И. Информационный бизнес: коммерческое распространение и маркетинг. – М.: Финансы и статистика, 1993.

Поступила в редколлегию 03.03.09

М.Д. ГОДЛЕВСКИЙ, д-р техн. наук, проф., зав. каф. АСУ НТУ «ХПИ»,
А. А. СТАНКЕВИЧ, ассистент каф. АСУ НТУ «ХПИ»

ПРИНЦИПЫ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА МОДЕЛИ ТРАНСПОРТНО-СКЛАДСКОЙ СИСТЕМЫ ТРАНСНАЦИОНАЛЬНОЙ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ КОМПАНИИ

У роботі проведено обґрунтування структури регіональної транспортно-складської системи логістичної компанії. Розроблено обґрунтовану модель процесу доставки товарів споживачу, яка складається з ряду етапів зберігання та транспортування товарів. Намічені шляхи її структурно-параметричного синтезу.

В работе проведено обоснование структуры региональной транспортно-складской системы логистической компании. Разработана обобщенная модель процесса доставки товаров потребителю, которая состоит из ряда этапов хранения и транспортировки товаров. Намечены пути ее структурно-параметрического синтеза.

The substantiation of regional structure of warehouse-transportation system in logistics company is made. The general model of the goods delivery to a consumer, which consists of storage and transportation actions is developed. Ways of structural and parametrical synthesis is planned.

1. Введение. В современной цепи поставщиков продукции необходимо выделить работу отдельных логистических компаний, предоставляющих услуги хранения и распределения товаров от начала производственной цепи до полок магазинов. Учитывая процессы глобализации мировой экономики и количество вовлеченных стран в производственную цепь, а также их территориальное расположение в этой цепи, работа логистических компаний становится стратегически актуальной и важной. Одной из основных задач компаний производителей является определение потребительского спроса на товары необходимой категории в заданном регионе в необходимое покупателю время. Для решения такой задачи необходим тщательный анализ географического региона на предмет потребительского спроса и реализация продукции в соответствии со спросом на основе результатов этого анализа и информации о самом товаре, его свойствах и требованиях к хранению и передвижению. Цель логистических компаний, обслуживающих сферу производства, состоит в обеспечении доставки товаров покупателю с минимальными затратами в установленные сроки. Для этого необходимо решать задачу структурно-параметрического синтеза транспортно-складской системы, которая состоит в определении: оптимального количества складов и их расположения, обличовых характеристик каждого склада, оптимальной системы перевозок товаров от производителя на склад и далее потребителю, области использования каждого склада и т.д. Значительным фактором, влияющим на формирование транспортно-складской системы (ТСС) является

сезонность потребления товара, длительность пика и разница объемов потребления (максимальная и минимальная величины колебания). Таким образом, оптимально построенная ТСС позволит доставлять необходимое количество товаров конечному потребителю в нужное время, минимизируя затраты, а значит увеличивая прибыль.

2. Обоснование структуры ТСС. Основные функциональные составляющие рассматриваемой в работе системы и их взаимосвязь приведены на рис. 1. Так как цель компаний производителей продукции состоит в обеспечении продукцией ее потребителей в заданном регионе и в заданные сроки, то для решения этой задачи необходимо формировать прогноз спроса. В качестве потребителей продукции рассматриваются различные магазины, супермаркеты и т.д., имеющие свои локальные склады. Транспортно-складская система является функциональной составляющей, обеспечивающей «мост» между производством и потреблением продукции. Проведем ее анализ с точки зрения синтеза структуры.

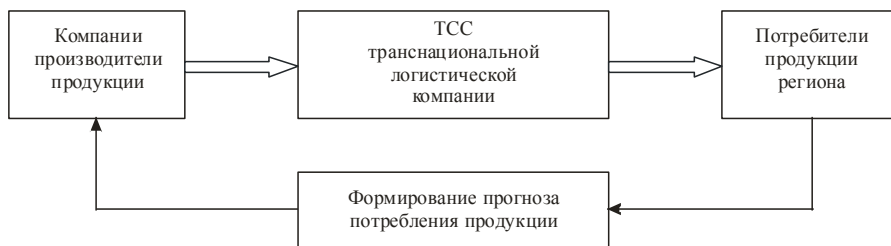


Рис. 1. Функциональная структура рассматриваемой системы

Структура ТСС зависит от размеров рассматриваемой территории, объемов потребляемой продукции и ее номенклатуры, а также от географического расположения компаний производителей продукции. Так как в качестве географической территории в дальнейшем будет рассматриваться Украина, то на основе экспертных оценок специалистов предлагается следующая трехуровневая транспортно-складская система:

- верхний, национальный уровень;
- средний, региональный уровень;
- нижний, локальный уровень.

Верхний уровень ТСС представляет собой складские комплексы, обладающие высокой пропускной способностью, покрывающие потребление товара во всем географическом регионе. Основной функцией таких складов является концентрация товара в регионе от компаний поставщиков. Номенклатура товара в полном объеме скапливается в складах для дальнейшего распределения в регионы, но меньшими партиями. Количество

складов национального уровня зависит от размера географической территории и от типа транспорта, используемого при доставке товара от производителей, который выбирается с целью оптимизации транспортных расходов.

Средний, региональный уровень представляет собой промежуточные склады в географическом регионе, покрываемом складами национального уровня. Будем считать, что каждый склад регионального уровня покрывает свою территорию (часть территории национального уровня) и продукция потребляется в полном объеме номенклатурного списка. Совокупное количество продаваемого товара может изменяться ввиду множества факторов, таких как экономическое развитие региона, интенсивность рекламной компании и как результат – необходимость в дополнительном потреблении продукта.

Нижний, локальный уровень распределения конечному потребителю представляет собой склады торговых центров, например супермаркетов и специализированных магазинов. В этих точках осуществляется продажа товара, т.е. выход товара из распределительной системы.

Разница в работе трех уровней ТСС основывается на отличии объема входа и выхода продукции на складах, а также транспортных средств, используемых между уровнями ТСС. Различные объемы движения товара через склады определяют не только необходимую площадь хранения, но и техническое оснащение этих помещений, а также определяют различные складские процессы для обработки грузов. Национальный уровень ТСС предполагает передвижение одной номенклатурной единицы в большом объеме крупными транспортными единицами или разными видами транспорта, например, морские и автодорожные перевозки. Дальнейшее распределение товаров в регионы предполагает смешивание всех номенклатурных единиц между собой в небольшом объеме. Такие операции требуют дополнительных складских площадей и техники для эффективной работы, т.е. других обликовых характеристик. Склады среднего уровня ТСС должны обладать техническими характеристиками для обработки большой номенклатуры товара в небольшом количестве. Далее поток товара еще в меньшем количестве направляется малотоннажными транспортными средствами в конечные точки распределения нижнего уровня ТСС.

3. Основные этапы процесса доставки товаров потребителю.

Исходя из предложенной структуры ТСС процесс доставки товаров потребителю можно разбить на пять подпроцессов и в соответствии с этим формировать пять взаимосвязанных моделей с целью оптимизации их структуры и параметров. Рассмотрим в обобщенном виде модели каждого из этих подпроцессов. Предварительно введем следующие параметры и переменные:

x_{ij}^t – прогноз объема j -го типа товара соответствующего производителя

продукции для i -го потребителя продукции в t -м подпериоде планирования, где $i \in I^t$ – множество потребителей товаров рассматриваемого региона;

J_φ^t – множество типов товаров, производимых φ -й фирмой, где: $j \in J_\varphi^t$,

$\varphi \in \Phi^t$ – множество фирм производителей товаров;

L^t – множество складов национального уровня.

Этап 1. Доставка товаров фирмами производителями на национальные склады. Так как j -й тип товара может быть доставлен на любой национальный склад, то введем параметр

$$\bar{x}_j^t = \sum_{i \in I^t} x_{ij}^t, \quad j \in J_\varphi^t, \quad \varphi \in \Phi^t,$$

определяющий прогноз объемов товаров j -го типа, который должен поступить в ТСС для его доставки потребителю. В результате первый подпроцесс для t -го подпериода планирования может быть записан следующим образом

$$\left\{ \bar{x}_j^t, \quad j \in J_\varphi^t, \quad \varphi \in \Phi^t \right\} \xRightarrow{\pi_1(L^t)} \left\{ \bar{\bar{x}}_{jl}^t, \quad l \in L^t \right\}, \quad j \in J_\varphi^t, \quad \varphi \in \Phi^t, \quad (1)$$

где $\pi_1(L^t)$ – оператор, реализующий оптимальную стратегию распределения продукции между множеством L^t складов национального уровня, а переменные $\bar{\bar{x}}_{jl}^t$ определяют объем j -го типа товара, который должен быть доставлен на l -й склад в течение t -го подпериода планирования. При этом

$$\bar{x}_j^t = \sum_{l \in L^t} \bar{\bar{x}}_{jl}^t, \quad j \in J_\varphi^t, \quad \varphi \in \Phi^t.$$

Этап 2. Хранение товаров на складах национального уровня. При рассмотрении данного подпроцесса необходимо решить задачу определения оптимальных обликковых характеристик каждого склада национального уровня, их количество и место расположения.

Введем вектор $V_l^t = \{V_{ls}^t, s \in S\}$, определяющий обликковые характеристики l -го национального склада, где V_{ls}^t – размер площадей (объем помещений), для s -го вида хранения товаров. S – множество видов хранения товаров. При этом будем считать, что подмножество $\hat{J}_{\varphi s}^t$ определяет множество типов товаров s -го вида хранения φ -й фирмы при условии

$$J_\varphi^t = \bigcup_{s \in S} \hat{J}_{\varphi s}^t, \quad \varphi \in \Phi^t; \quad \bar{J}_s^t = \bigcup_{\varphi \in \Phi^t} \hat{J}_{\varphi s}^t, \quad s \in S.$$

Будем считать заданными:

1) технологии хранения, приема и отгрузки товаров на каждом l -м складе национального уровня;

2) законы поступления Γ_l^{ts} и отгрузки Λ_l^{ts} на l -м складе товаров в объеме y_l^{ts} s -го вида хранения в течение t -го подпериода планирования, где

$$y_l^{ts} = \sum_{j \in J_s^t} \bar{x}_{jl}^t, \quad s \in S, \quad l \in L^t.$$

В результате второй подпроцесс для t -го подпериода планирования запишем в следующем виде

$$\left\{ \Gamma_l^{ts}(y_l^{ts}), \quad s \in S, \quad l \in L^t \right\}^{\{\pi_2^l(V_l^t) | l \in L^t\}} \Rightarrow \left\{ \Lambda_l^{ts}(y_l^{ts}), \quad s \in S, \quad l \in L^t \right\}, \quad (2)$$

где $\pi_2^l(V_l^t)$ – оператор, реализующий технологию хранения, приема и отгрузки товаров на l -м складе национального уровня с обликowymi характеристиками, определяемыми вектором V_l^t .

Этап 3. Доставка товаров со складов национального уровня на склады регионального уровня. Данный подпроцесс запишем в следующем виде

$$\left\{ \left\{ \bar{x}_{jl}^t, \quad j \in J_\varphi^t, \quad \varphi \in \Phi^t \right\}, \quad l \in L^t \right\}^{\{\pi_3^l(K_l^t) | l \in L^t\}} \Rightarrow \left\{ \left\{ \tilde{x}_{jl}^{tk}, \quad j \in J_\varphi^t, \quad \varphi \in \Phi^t, \quad k \in K_l^t \right\}, \quad l \in L^t \right\}, \quad (3)$$

где K_l^t – множество складов регионального уровня, ориентированных на l -й склад национального уровня. При этом выполняются следующие условия

$$K_l^t \subset K^t = \bigcup_{l \in L^t} K_l^t, \quad l \in L^t; \quad \bigcap_{l \in L^t} K_l^t \neq \emptyset.$$

Это означает, что отдельные склады регионального уровня получают товары из нескольких складов национального уровня. $\tilde{x}_{jl}^{tk}$ – объем j -го типа товаров, которые должны быть доставлены на k -й склад регионального уровня с l -го склада национального уровня в течение t -го подпериода планирования при условии

$$\bar{x}_{jl}^t = \sum_{k \in K_l^t} \tilde{x}_{jl}^{tk}, \quad j \in J_\varphi^t, \quad \varphi \in \Phi^t, \quad l \in L^t.$$

Оператор $\pi_3^l(K_l^t)$, как и оператор $\pi_1(L^t)$, реализует решение двух типов задач:

- 1) оптимальный план доставки грузов со складов национального уровня на склады регионального уровня (задача маршрутизации);
- 2) формирование оптимального комплекса транспортных средств (КТС) для решения первой задачи. При этом возможны три постановки данной проблемы:
 - логистическая компания ориентируется на свои транспортные средства и тогда стоит задача формирования их оптимального типоразмерного ряда;
 - логистическая компания арендует транспортные средства и тогда стоит задача реализации оптимальных арендных условий;
 - смешанный вариант, когда имеется определенный КТС, а недостаток транспортных средств арендуется.

Этап 4. Хранение товаров на региональных складах. Как и для второго этапа, в этом случае необходимо решать аналогичные следующие задачи:

- 1) определение множества складов регионального уровня K_l^t , которые будут получать продукцию с l -го склада национального уровня, где $l \in L^t$;
- 2) определение местоположения каждого склада регионального уровня из множества K^t ;
- 3) формирование обличковых характеристик каждого склада регионального уровня, которые определяются вектором $\bar{V}_k^t = \{\bar{V}_{ks}^t, s \in S\}$, $k \in K^t$. $\bar{V}_{ks}^t$ – размер площадей (объем помещений) для s -го вида хранения продукции в k -м складе регионального уровня с учетом оснащения этих помещений соответствующим оборудованием и технологиями.

При этом будем считать заданными:

- 1) технологии хранения, приема и отгрузки товаров на каждом k -м складе регионального уровня;
- 2) законы поступления $\hat{\Gamma}_k^{ts}$ и отгрузки $\hat{\Lambda}_k^{ts}$ на k -м складе товаров в объеме $\bar{y}_k^{ts}$ s -го вида хранения в течение t -го подпериода планирования, где

$$\bar{y}_k^{ts} = \sum_{l \in L^t} \sum_{j \in J_l^t} \tilde{x}_{jl}^{tk}, \quad s \in S, \quad k \in K^t.$$

В результате четвертый подпроцесс для t -го подпериода планирования запишем в следующем виде

$$\left\{ \hat{\Gamma}_k^{ts}(\bar{y}_k^{ts}), s \in S, k \in K^t \right\} \Rightarrow \left\{ \hat{\Lambda}_k^{ts}(\bar{y}_k^{ts}), s \in S, k \in K^t \right\}, \quad (4)$$

где $\pi_4^k(\bar{V}_k^t)$ – оператор, реализующий технологию хранения, приема и отгрузки товаров на k -м складе регионального уровня с обликowymi характеристиками, определяемыми вектором $\bar{V}_k^t$.

Этап 5. Доставка товаров со складов регионального уровня на локальные склады потребителей продукции. Данный подпроцесс запишем в следующем виде

$$\begin{aligned} \left\{ \tilde{x}_j^{tk}, j \in J_\varphi^t, \varphi \in \Phi^t, k \in K^t \right\} &\Rightarrow \left\{ \pi_5^k(\bar{I}_k^t), k \in K^t \right\} \\ \left\{ x_{ij}^{tk}, j \in J_\varphi^t, \varphi \in \Phi^t, i \in \bar{I}_k^t, k \in K^t \right\}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\hat{x}_j^{tk}$ – объем j -го типа товаров поступающих на k -й региональный склад в течение t -го подпериода планирования.

$$\hat{x}_j^{tk} = \sum_{l \in I^t} \tilde{x}_{jl}^{tk}, \quad j \in J_\varphi^t, \varphi \in \Phi^t.$$

$\bar{I}_k^t$ – множество складов на локальном уровне, которые получают продукцию с k -го склада регионального уровня. Будем считать, что выполняются следующие условия

$$\bar{I}_k^t \subset I^t = \bigcup_{k \in K^t} \bar{I}_k^t, \quad k \in K^t; \quad \bigcap_{k \in K^t} \bar{I}_k^t = \emptyset.$$

Это означает, что каждый склад на локальном уровне получает продукцию только с одного склада регионального уровня. x_{ij}^{tk} – объем j -го типа товаров, которые должны быть доставлены на i -й склад локального уровня с k -го склада регионального уровня в течение t -го подпериода планирования при условии

$$\hat{x}_j^{tk} = \sum_{i \in \bar{I}_k^t} x_{ij}^{tk}, \quad j \in J_\varphi^t, \varphi \in \Phi^t, k \in K^t.$$

Оператор $\pi_5^k(\bar{I}_k^t)$ обеспечивает решение задач, аналогичных первому и третьему этапам процесса доставки товаров конечному потребителю.

4. Предварительный анализ процесса доставки товаров потребителю. Исходя из структуры ТСС, проведена формализация пяти подпроцессов

доставки товаров потребителю. Для каждого подпроцесса определены основные переменные и операторы, которые должны обеспечить оптимальную стратегию реализации соответствующего подпроцесса. Как видно из (1)–(5), за счет общих переменных обобщенных моделей отдельных подпроцессов они тесно взаимосвязаны, и исследовать отдельно каждый подпроцесс с точки зрения оптимизации его параметров нельзя без учета этого обстоятельства. Так, например, затраты на подпроцесс доставки товаров производителей продукции на национальные склады зависят от их количества, местоположения, обликовых характеристик. В свою очередь, от этих параметров (переменных) зависят затраты на хранение продукции на складах. Таким образом, стоит проблема тщательного анализа взаимосвязанных моделей с целью их декомпозиции и последующей координации их функционирования. Другое направление исследований – разработка схем оптимизации подобных динамическому программированию, когда осуществляется последовательный отбор лучших вариантов и отбрасывание тех, которые заведомо не могут претендовать на включение в оптимальную схему поставок продукции ее потребителям. Именно этим вопросам и будут посвящены дальнейшие исследования авторов.

Поступила в редколлегию 24.02.09

УДК 62-50

Е. П. ГОМОЗОВ, канд. физ.-мат. наук, доцент НТУ «ХПИ»,
М. В. МЕЗЕРНАЯ, ст. преподаватель НТУ «ХПИ»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОЦЕНКИ БИЗНЕСА С ПОМОЩЬЮ УРАВНЕНИЙ ТИПА БЛЕКА-СКОЛЗА

Розглянуто задачу визначення стратегії управління бізнесом по капіталізації. Уведено математичну модель оцінки бізнесу та очікуваної інвестором процентної ставки.

Рассмотрена задача определения стратегии управления бизнесом по капитализации. Введена математическая модель оценки бизнеса и ожидаемой инвестором процентной ставки.

The problem of determining the management strategy of business capitalization considered. A mathematical model for assessing the business and the expected investor interest was infused.

Введение. Еще недавно общепринятой финансовой теорией была версия модели эффективного рынка (ЕМН), в соответствии с которой цены отражают всю публичную информацию. Аналитики ценных бумаг становятся причиной рыночной эффективности. Фундаменталисты формируют справедливую цену путем консенсуса. [1] Развитие экономики финансов

продолжалось на основе слабой формы ЕМН и ее предположении о том, что ценовые изменения независимы. Главными достижениями были модель расчета цен опционов Блека и Сколза [2]

Современная экономическая практика характеризуется наличием структурно неустойчивых рынков, включенных в качестве узлов в функционирующую в режиме реального времени сеть мировой экономики. Как показали многочисленные исследования, на таких рынках рыночные прибыли не следуют нормальному распределению, волатильность может быть весьма неустойчивой.

Таким образом, подтвердилось предположение Петерса [3], о том, что люди не признают трендов и не реагируют на них до тех пор, пока эти тренды хорошо не устанавливаются и принимают решение, которое обусловлено накопленной, но до этого игнорируемой информацией. Такое поведение коренным образом отличается от предполагаемых действий рационального инвестора, который, в соответствии с ЕМН, немедленно использует новую информацию для принятия инвестиционных решений. ЕМН хорошо моделируется уравнениями типа диффузии.

Фрактальная модель рынка (FMN) создавалась как альтернатива к ЕМН. FMN придает особое значение влиянию информации и инвестиционным горизонтам в поведении инвесторов. Основными инструментами FMN служат фрактальная геометрия и теория хаотических систем.

Основные пять предположений выдвинуты Петерсом для FMN [4]:

- Рынок создают множество индивидуумов с большим количеством различных инвестиционных горизонтов.
- В структуре FMN справедливы и технический, и фундаментальный анализ, потому что влияние информации в основном зависит от каждого индивидуального инвестиционного горизонта.
- Основополагающим фактором, влияющим на стабильность рынка, является ликвидность. Ликвидность достигается, когда рынок состоит из множества инвесторов с множеством различных инвестиционных горизонтов. Таким образом, рыночная стабильность определяется фрактальной структурой инвестиционных горизонтов участников.
- Цены отражают комбинацию краткосрочного технического анализа и долгосрочной фундаментальной оценки.
- Если риск не связан с экономическим циклом, то не будет существовать долгосрочных трендов.

Цель FMN – создать модель поведения инвестора и движения рыночных цен, которая соответствует наблюдениям. Когда рынок стабилен, ЕМН работает достаточно хорошо. Но как только наступает паника и обвал рынка, ЕМН, модель арбитражного ценообразования (АРТ) и модель ценообразования капитальных активов (САРМ) дают сбой, поскольку являются равновесными моделями, которые не приспособлены к нестабильным условиям.

Основными инструментами FMH служат фрактальная геометрия и теория хаотических систем. Необходимость в применении теории хаотических систем возникает при анализе финансовых данных за большой период времени.

Постановка задачи. Получить динамические модели оценки бизнеса и процентных ставок на основе FMH.

Модели измерения риска. Любая математическая модель оценки рисков, которая претендует на адекватность описания портфелей брендов, должна иметь точки бифуркации типа бифуркации Хопфа и бифуркации цикла со срывом в хаотический режим.

При построении моделей на основе FMH мерой систематического риска в задачах оценки бизнеса уместно считать *фрактальную размерность* $D(S)$ временного ряда наблюдаемых цен или $D(r)$ временного ряда наблюдаемых доходностей.

Мерой несистематической компоненты риска в таких задачах уместно считать величину H , где H – показатель Херста.

Эти условия, на самом деле, устанавливают соотношения между динамическими и фрактальными аспектами хаотических режимов поведения рынков ценных бумаг.

Прогнозная модель оценки стоимости бизнеса на основе фундаментального анализа. Обозначим через $V(t)$ текущая стоимость бизнеса, $\mu(t)$ – ожидаемую доходность, $\sigma(t)$ – среднее квадратичное отклонение выборки стоимостей, $W(t)$ – стандартный независимый винеровский процесс. Функции $V(t)$, $\mu(t)$, $\sigma(t)$ определяются на основе процедур независимой оценки бизнеса и моделирования на основе ретроспективного временного ряда полученных результатов. Эта процедура по определению отражает взгляды типичного инвестора с длинным инвестиционным горизонтом, поэтому изменение стоимости бизнеса можно описать достаточно стандартным стохастическим уравнением:

$$dV(t) = V(t)[\mu(t)dt + \sigma(t)dW(t)] \quad (1)$$

Под текущей доходностью бизнеса будем понимать

$$\ln V(t) = \int_0^t \mu(t)dt + \int_0^t \sigma(t)dW(t) \quad (2)$$

Прогнозная модель оценки стоимости бизнеса на основе технического анализа.

Современные трейдеры с максимум однодневным инвестиционным горизонтом будут в большей степени интересоваться информацией, получаемой из технического анализа, для них фундаментальная информация имеет небольшое значение.

Поэтому для моделирования прогнозной стоимости акций на фондовой бирже и их доходностей представляется уместным использовать процессы типа Парето-Леви, обладающие фрактальными свойствами. В дальнейшем через $\omega(t)$ обозначим фрактальный броуновский процесс, $r(t)$ – ставку доходности операции с акциями.

Будем считать, что наиболее приемлемой моделью ставки доходности на фондовом рынке является модель типа Блека, Бермана, Тоя:

$$dr(t) = \alpha(t)r(t)dt + \gamma d\omega(t) \quad (3)$$

Динамическая модель оценки рыночной капитализации бизнеса типа уравнения Блека-Сколза.

Примем, что стоимость акции $S(V,t)$ является своего рода производным финансовым инструментом от рыночной стоимости бизнеса, полученной в результате расчетов по описанной выше модели в соответствии с формулами (1,2). Обозначим далее через μ безрисковую ставку доходности (для ее подсчета используется модель *spot rate* для «оторванных» Treasury bill по программе STRIPS).

Как известно, в силу уравнения (1) $V(t)$ эволюционирует как процесс Ито. Поэтому можно использовать лемму Ито для модели изменения стоимости $S(V,t)$:

$$dS = (S_t + \mu S_V + 0,5\sigma^2 V^2 S_{VV})dt + \sigma V S_V dW \quad (4)$$

С другой стороны, мгновенное изменение стоимости $S(V,t)$ с учетом накопленной информации: $dS = rSdt + \sigma V S_V dW$, что, учитывая уравнение (4), дает искомую **модель оценки рыночной капитализации бизнеса**:

$$S_t + \mu S_V + 0,5\sigma^2 V^2 S_{VV} = rS \quad (5)$$

Численные расчеты были проведены по данной модели на примерах, взятых из листингов акций Нью-Йоркской фондовой биржи (NYSE). Эти листинги размещены на сайте www.nyse.com. Результаты расчетов показали как высокую степень согласованности модельных показателей с реальными, так и возможность прогнозирования точек перелома тренда.

Были получены также критические значения показателя μ для разных классов акций. Модельное поведение рынка акций на NYSE оказалось близким к реальному. В частности, при переходе значения μ через критическое, описываемые моделью бифуркации типа эффекта Фейгенбаума оказывались близкими к реальному поведению фондового рынка в условиях мирового финансового кризиса.

Выводы. Предлагаемые динамические фрактальные модели имеют компьютерную реализацию. Классические методы приближенных решений дифференциальных уравнений дополнены вычислительными методами

теории бифуркаций и стохастического программирования. Необходимые параметры определяются по данным фондового рынка.

Список литературы: 1. Lorie J. H. and Hamilton M. T. The Stock Market: Theories and Evidence. – Homewood, IL: – Richard D. Irwin, – 1973. 2. Black F. and Scholes M. The Pricing of Options and Corporate Liabilities. – Journal of Business 45. – 1973. 3. *Пемперс Э.* Хаос и Порядок на Рынках Капитала: Новый аналитический взгляд на циклы, цены и изменчивость рынка. – М.: – Мир. – 2000. 4. *Peters E.* Fractal Market Analysis. Applying Chaos Theory to Investment & Economics. J. Wiley&Sons. – New York. – 1994.

Поступила в редколлегию 12.03. 09

УДК 681.519

С.В. КАДИГРОБ, ген. директор КП ПТП «Вода» (г.Харьков),
О.В. СЕРАЯ, канд. техн. наук, доцент НТУ «ХПИ»

МНОГОФАКТОРНЫЕ БИСЛУЧАЙНЫЕ МОДЕЛИ БЕЗОТКАЗНОСТИ СИСТЕМ

Розглянуто задачу оцінки безвідмовності систем, режим і умови функціонування яких визначаються значеннями випадкових величин з відомою щільністю розподілу. Відповідна математична модель є біслучайною. Запропонована методика розрахунку щільності розподілу тривалості безвідмовної роботи. Побудована напівмарківська модель функціонування системи. Методика доведена до кінцевих співвідношень в окремому випадку, коли чинники, які задають режим і умови експлуатації системи, є нормально розподіленими випадковими величинами.

Рассмотрена задача оценки безотказности систем, режим и условия функционирования которых определяются значениями случайных величин с известными плотностями распределения. Соответствующая математическая модель является бислучайной. Предложена методика расчета плотности распределения продолжительности безотказной работы. Построена полумарковская модель функционирования системы. Методика доведена до конечных соотношений в частном случае, когда факторы, задающие режим и условия эксплуатации системы, являются нормально распределенными случайными величинами.

The task of the faultlessness systems estimation is considered. The mode and operating of this systems are determined the random variables with the known probability density functions. The corresponding mathematical model is bifuzzy. The calculation method of probability density function of faultless work is offered. The half-Markov model of functioning of the system is built. A method is taken to eventual correlations in special case, when factors are the normally distribution variables.

Введение. Оценка безотказности систем является составной частью более общей задачи оценки эффективности функционирования систем в зависимости от режима и условий эксплуатации. Традиционный подход к решению задачи оценки безотказности состоит в следующем. Вводится набор

факторов $F = (F_1, F_2, \dots, F_m)$, численные значения которых задают условия и режим эксплуатации системы. Далее показатель безотказности системы, например, интенсивность отказов $\lambda(t)$, определяется как некая функция набора факторов F в виде

$$\lambda(F, t) = f(F_1, F_2, \dots, F_m; t). \quad (1)$$

Понятно, что возможности и эффективность использования соотношения (1) для решения конкретных задач зависят от того, каким образом выбрана аппроксимация этого соотношения. На практике широко используется регрессионное описание (1) в виде линейного по параметрам, но нелинейного по факторам полинома

$$\begin{aligned} \lambda(F, t) = & b_0 + \sum_{i=1}^{m+1} b_i F_i + \sum_{i=1}^{m+1} \sum_{i_2 > i_1} b_{i_1 i_2} F_{i_1} F_{i_2} + \sum_{i=1}^{m+1} \sum_{i_2 > i_1} \sum_{i_3 > i_2} b_{i_1 i_2 i_3} F_{i_1} F_{i_2} F_{i_3} + \\ & + \dots + \sum_{i=1}^{m+1} \sum_{i_2 > i_1} \dots \sum_{i_d > i_{d-1}} b_{i_1 i_2 \dots i_d} F_{i_1} F_{i_2} \dots F_{i_d}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь

$$F_{m+1} = t,$$

$b_{i_1 i_2 \dots i_d}$ - коэффициент, характеризующий влияние на интенсивность отказов $\lambda(F, t)$ взаимодействия факторов $F_{i_1} F_{i_2} \dots F_{i_d}$.

Соотношение (2) называется полиномом Колмогорова – Габора [1,2] и позволяет оценить значение интенсивности отказов для любого набора значений $F_1, F_2, \dots, F_m, t$. Отметим, что гораздо более удобная для практических целей аппроксимация выражения (1) будет получена, если фактор t («возраст» системы) выделить из числа взаимодействующих факторов следующим образом

$$\lambda(F, t) = a_0(F) + a_1(F)t + \dots + a_d(F)t^d. \quad (3)$$

Из этого соотношения, в частности, ясно, что скорость старения систем определяется коэффициентом $a_1(F)$, а ускорение старения – коэффициентом $a_2(F)$.

Зависимость интенсивности отказов системы в форме (3) позволяет решать задачи оценки и прогнозирования надежности систем. Например, вероятность безотказной работы системы в течение интервала $[0, T]$ при ее эксплуатации в условиях F определяется по формуле

$$\begin{aligned}
 P[0,T] &= \exp \left\{ - \int_0^T \lambda(F,t) dt \right\} = \exp \left\{ - \int_0^T \sum_{i=0}^d a_i(F) t^i dt \right\} = \\
 &= \exp \left\{ - \sum_{i=0}^d a_i(F) \frac{T^{i+1}}{i+1} \right\}.
 \end{aligned} \tag{4}$$

Более детализованное описание зависимости показателей надежности от численного значения факторов будет получено, если ввести совокупность регрессионных соотношений вида

$$a_i(F_1, F_2, \dots, F_m) = \sum_{k=1}^m c_{ik} F_k, \quad i = 0, 1, 2, \dots, d. \tag{5}$$

Тогда соотношение (3) примет вид

$$\lambda(F, t) = \sum_{i=0}^d \sum_{k=1}^m (c_{ik} F_k) t^i, \tag{6}$$

а вероятность безотказной работы системы на интервале $[0, T]$ будет вычисляться по формуле

$$P[0, T] = \exp \left\{ - \sum_{i=0}^d \sum_{k=1}^m (c_{ik} F_k) \frac{T^{i+1}}{i+1} \right\}. \tag{7}$$

При этом, неизвестные коэффициенты (c_{ik}) оцениваются по результатам контроля безотказности системы в ходе ее эксплуатации с использованием, например, метода максимума правдоподобия [3, 4].

С использованием (7) вероятность появления случайного события – отказ системы на интервале $[0, T]$ будет равна

$$Q[0, T] = 1 - P[0, T] = 1 - \exp \left\{ - \sum_{i=0}^d \sum_{k=1}^m (c_{ik} F_k) \frac{T^{i+1}}{i+1} \right\}. \tag{8}$$

Задача оценки безотказности систем существенно усложняется, если условия и режим их эксплуатации меняются, причем, для многих реальных систем случайным образом. Поставим задачу оценки безотказности систем в этой ситуации.

Постановка задачи. Пусть численные значения факторов $F_1, F_2, \dots, F_m$ - случайные величины с известными законами распределения $\varphi_1(F_1), \varphi_2(F_2), \dots, \varphi_m(F_m)$. Понятно, что при этом значение интенсивности отказов (6), а также вероятности безотказной работы (7) и отказа (8) тоже

будут случайными величинами. Математическая модель расчета значений вероятностей (7) и (8) в соответствии с терминологией, введенной в [5], является бислучайной. Рассмотрим методику построения бислучайной модели безотказности систем.

Основные результаты. Перепишем соотношение (7) следующим образом:

$$P[0, T] = \exp \left\{ - \sum_{i=0}^d \sum_{k=1}^m d_{ik} F_k \right\} = \exp \left\{ - \sum_{k=1}^m F_k \sum_{i=0}^d d_{ik} \right\}. \quad (9)$$

Введем неслучайные коэффициенты

$$D_k = \sum_{i=0}^d d_{ik} = \sum_{i=0}^d c_{ik} \frac{T^{i+1}}{i+1}, \quad k = 1, 2, \dots, m.$$

Тогда (9) запишется в виде

$$P[0, T] = \exp \left\{ - \sum_{k=1}^m D_k F_k \right\}.$$

Таким образом, случайная величина $P[0, T]$ является линейной комбинацией совокупности случайных величин $F_1, F_2, \dots, F_m$. Поскольку плотности распределения этих величин, по предположению, известны, то в соответствии со стандартными методами теории вероятностей [6] может быть определена плотность распределения случайной величины (9). Следует, однако, заметить, что сложность решения этой задачи для произвольных плотностей $\varphi_k(F_k)$, $k = 1, 2, \dots, m$, быстро растет с увеличением числа факторов. Вместе с тем, решение может быть легко получено в частном случае, когда случайные величины $F_1, F_2, \dots, F_m$ распределены нормально. В соответствии с этим пусть

$$\varphi_k(F_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_k} \exp \left\{ - \frac{(F_k - m_k)^2}{2\sigma_k^2} \right\}, \quad k = 1, 2, \dots, m. \quad (10)$$

При этом плотность распределения случайной величины $P[0, t]$ будет иметь вид

$$\varphi(P[0, t]) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_P(t)} \exp \left\{ - \frac{(P - m_P(t))^2}{2\sigma_P^2(t)} \right\}, \quad (11)$$

где

$$m_{\Sigma}(t) = \sum_{k=1}^m D_k(t) m_k, \quad \sigma_{\Sigma}^2(t) = \sum_{k=1}^m D_k^2(t) \sigma_k^2. \quad (12)$$

Тогда плотность распределения продолжительности безотказной работы определяется соотношением

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= \int_0^1 \varphi(P[0, t]) dp = \\ &= \int_0^1 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Sigma}(t)} \exp\left\{-\frac{(P-m_{\Sigma}(t))^2}{2\sigma_{\Sigma}^2(t)}\right\} dp \frac{p-m_{\Sigma}(t)}{\sigma_{\Sigma}(t)} = u \\ &= \int_{\frac{-m_{\Sigma}(t)}{\sigma_{\Sigma}(t)}}^{\frac{1-m_{\Sigma}(t)}{\sigma_{\Sigma}(t)}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{u^2}{2}\right\} du = \frac{1}{2} \left[\Phi\left(\frac{1-m_{\Sigma}(t)}{\sigma_{\Sigma}(t)}\right) + \Phi\left(\frac{m_{\Sigma}(t)}{\sigma_{\Sigma}(t)}\right) \right]. \end{aligned} \quad (13)$$

Полученные соотношения позволяют построить полумарковскую модель безотказности системы. Опишем эту модель. Введем

E_0 - состояние нормального функционирования системы;

E_1 - состояние отказа системы, в котором происходит ее восстановление;

$\varphi_{01}(t) = \varphi(t)$ - плотность распределения случайной продолжительности пребывания системы в состоянии нормального функционирования E_0 до перехода в состояние отказа E_1 (параметры этой плотности распределения рассчитываются по формулам (9) - (13));

$\varphi_{10}(t)$ - плотность распределения случайной продолжительности восстановления;

$P = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ - матрица вероятностей перехода для марковской цепи, вложенной в полумарковский процесс переходов системы из состояния E_0 в состояние E_1 и обратно, описываемый плотностями распределения $\varphi_{01}(t)$, $\varphi_{10}(t)$.

Тогда, как известно [7], стационарное распределение вероятностей состояний системы имеет вид

$$\Phi_s = \frac{\pi_s T_s}{\sum_{k=0}^1 \pi_k T_k}, \quad s = 0, 1,$$

где (π_0, π_1) - финальное распределение вероятностей состояний для вложенной марковской цепи,

T_s - средняя продолжительность пребывания системы в состоянии s до ухода, $s = 0, 1$.

Финальное распределение вероятностей состояний для марковской цепи, вложенной в изучаемый полумарковский процесс найдем, решая векторно-матричное уравнение

$$(\pi_0, \pi_1) = (\pi_0, \pi_1)P = (\pi_0, \pi_1) \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (15)$$

совместно с условием нормировки

$$\pi_0 + \pi_1 = 1. \quad (16)$$

Из (15), (16) следует, что

$$\pi_0 = \pi_1 = \frac{1}{2}. \quad (17)$$

Далее

$$\begin{aligned} T_0 &= \int_0^{\infty} t \varphi_{01}(t) dt = \\ &= \int_0^{\infty} \frac{t}{2\sqrt{2\pi}\sigma_{\Sigma}(t)} \left[\Phi\left(\frac{1-m_{\Sigma}(t)}{\sigma_{\Sigma}(t)}\right) + \Phi\left(\frac{m_{\Sigma}(t)}{\sigma_{\Sigma}(t)}\right) \right] dt, \quad (18) \\ T_1 &= \int_0^{\infty} t \varphi_{10}(t) dt. \end{aligned}$$

Приведенные соотношения (17), (18) позволяют рассчитать искомое распределение вероятностей состояний системы (14).

Выводы. Таким образом, получена бислучайная модель безотказности системы, режим и условия эксплуатации которой задаются набором случайных значений факторов с известными плотностями распределения. Методика доведена до конечных соотношений для частного случая, когда случайные значения факторов имеют нормальный закон распределения.

Список литературы. 1. Гаскаров Д.В. Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры / Д.В. Гаскаров, Т.А. Голикевич, А.В. Мозгалецкий. – М.: Сов. Радио, 1974. – 224 с. 2. Костенко Ю.Т. Прогнозирование технического состояния систем управления / Ю.Т. Костенко, Л.Г. Раскин. – Х.: Основа, 1996. – 303 с. 3. Крамер Г. Математические методы статистики: пер. с англ. / Г. Крамер. – М.: Мир, 1975. – 648с. 4. Барзилович Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем / Е.Ю. Барзилович.- М: Высшая школа, 1982. – 232с. 5. Лю Б. Теория и практика неопределенного программирования: пер. с англ. / Б. Лю. – М.: БИНОМ, 2005. – 416с. 6. Венцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Венцель. – М.: Наука, 1969. – 576 с. 7. Вопросы математической теории надежности / Под. ред. Гнеденко Б.В. – М.: Радио и связь, 1983. – 376с.

Поступила в редколлегию 16.03.09

УДК 621.311.003

Е.В. ЗАПАРА, аспирант НТУ «ХПИ»

ПРИНЦИПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНКУРЕНТНОГО ОПТОВОГО РЫНКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Наведена інформація про реформування структури оптового ринку електроенергії (ОРЕ) України. Приведений огляд підходів до моделювання функціонування конкурентних оптових ринків електроенергії та наведені принципи побудови мультиагентної імітаційної моделі ОРЕ України.

Представлена информация о реформировании структуры оптового рынка электроэнергии (ОРЭ) Украины. Сделан обзор подходов к моделированию функционирования конкурентных оптовых рынков электроэнергии и сформулированы принципы мультиагентной модели ОРЭ Украины.

The information about Ukrainian wholesale electricity market structure reform has been presented. The survey of competitions electricity wholesale markets modeling methods has been done and the principles of multi-agent simulation model of Ukrainian wholesale electricity market have been defined.

Введение. Важным вопросом в настоящее время является совершенствование энергетических рынков Украины и внедрение в соответствии с мировой практикой эффективных механизмов конкуренции и государственного регулирования. В 2002 г. Кабмином Украины была принята Концепция функционирования и развития оптового рынка электрической энергии (ОРЭ) Украины [1], которая предусматривает постепенный переход к модели двусторонних договоров с балансирующим рынком (ДДБР) - наиболее широко применяемой в мире в последнее время. Цель реформы - сделать рынок привлекательнее для инвесторов, что будет способствовать привлечению инвестиций в отрасль и снижению цен за счет большей конкуренции. Разработку рекомендаций по реформированию ОРЭ Украины осуществляет консультационный консорциум в составе: КЕМА, ЕСА, Norton

Rose, Mycroft, DIW и Трансэнергоконсалтинг. Внедрение новой модели рынка планируется осуществить поэтапно в течении 2009 – 2014 гг.

Постановка проблемы. Модель ДДБР состоит из нескольких субрынков, которые охватывают различные временные интервалы: рынок долгосрочных договоров, рынок «на сутки вперед» и балансирующий рынок. Участники рынка свободны в выборе между комбинацией долго-, средне- и краткосрочных договоров и покупкой или продажей электроэнергии на балансирующем рынке [2].

Сложность этой модели в том, что объемы электроэнергии, отмеченные в контрактах между участниками рынка, должны быть согласованы с работой системы в реальном времени. Поэтому устанавливаются детально разработанные и обязательные правила предоставления информации об объемах электрической энергии в контрактах Оператору системы. На балансирующем рынке для участников создаются ценовые стимулы для приближения объемов электрической энергии по контрактам покупки-продажи к фактическим. Для этого устанавливаются две разных цены в зависимости от того покупается или продается электроэнергия.

Модель ДДБР предоставляет широкие возможности участникам рынка электроэнергии по оптимизации своей деятельности. Кроме возможности варьировать договорные объемы электроэнергии на разных субрынках и управлять своими ценовыми рисками с помощью долгосрочных двухсторонних контрактов, участники ОРЭ могут, например, объединяться в балансирующие группы для оплаты только за сальдованные небалансы или участвовать в работе добровольной биржи электроэнергии для более гибкого уточнения своих договорных позиций.

Новая модель рынка требует более сложной информационной системы управления рынком и диспетчеризации энергосистемы, чем существующие. В странах с подобной ДДБР архитектурой ОРЭ накоплен достаточно большой опыт управления функционированием энергосистемы в конкурентных условиях. Очевидна необходимость использования успешных решений и наработок, которые используются в других странах с аналогичной моделью энергорынка, но необходима их адаптация к особенностям украинской энергосистемы.

Специфика предметной области требует использования модели объекта управления из-за того, что невозможно исследовать особенности функционирования новой архитектуры рынка в существующих условиях на реальной энергосистеме. Также важными являются вопросы моделирования поведения участников ОРЭ, эффективности правил функционирования рынка и системы управления, тестирования информационной технологии управления ДДБР, обучения персонала. Эти вопросы можно успешно решать с помощью имитационной модели ОРЭ.

Цели статьи. Важной задачей при создании информационной системы управления функционированием ОРЭ является построение адекватной

имитационной модели энергосистемы и динамики рынка. Статья посвящена обзору методов моделирования оптовых рынков электроэнергии и рассмотрению принципов такого моделирования для ОРЭ Украины.

Анализ литературных источников по вопросам моделирования конкурентных рынков электроэнергии показал, что за последние 15 лет проведен ряд успешных исследований в университетах Европы и США по этой теме [3]. Удачно зарекомендовал себя подход агентного моделирования [4], представляющий моделируемую систему в виде совокупности интеллектуальных агентов, которые могут самостоятельно реагировать на внешние воздействия со стороны окружающей среды и других агентов и осуществлять ответные действия. Общее состояние системы, при таком подходе, является результатом взаимодействия всех агентов и внешней среды. Этот подход к моделированию включает также оптимизационные и балансовые модели при описании функционирования разных типов агентов-участников рынка. Далее будет рассматриваться только агентное моделирование ОРЭ, как наиболее эффективное средство для решения исследовательских задач в этой предметной области.

Можно выделить несколько основных направлений в моделировании энергорынков [3], направленных на анализ возможностей конкретной структуры рынка, изучение поведения участников рынка, рассмотрение вопросов развития инфраструктуры и принятия решений участниками рынка в долгосрочной перспективе.

Первое направление моделирования включает ряд исследований структуры рынка, определения её эффективности для конкретных энергосистем. Здесь применяется комбинация моделей рынка и электросети для учета технических ограничений по передаче электроэнергии, рассматриваются различные механизмы клиринга и рыночных стратегий. Можно выделить проекты Marketecture [5] и AMES [6], как наиболее полные исследования этого направления.

При моделировании поведения агентов используются такие подходы, как обучение с поддержкой [7] и генетические алгоритмы обучения [8]. Рассматриваются вопросы функционирования генерирующих компаний и потребителей при заключении двухсторонних контрактов, участия в аукционах и балансирующем рынке.

Вопросы развития энергетической инфраструктуры рассматриваются на комплексных моделях энергетической отрасли, которые, кроме моделей электроэнергетических рынков, включают модели рынков нефтепродуктов и природного газа. Примерами таких проектов являются SMART II+ [9] и EMCAS [10].

Создан целый ряд коммерческих систем от различных производителей программного обеспечения для моделирования оптовых рынков в энергосистемах различных государств: Gridview (разработчик - ABB); LMPSIM (Shaw PTI), MAPS (General Electric), PROMOD VI (Siemens AG),

PROSYM (Henwood), UPLAN (LCG), Electricity Market Module of National Energy Modelling System – NEMS (DOE/EIA).

Проекты по моделированию конкурентных рынков электроэнергии охватывают широкий спектр проблем в этой области - от вопросов оптимальных потоков электроэнергии до ценообразования и стратегии поведения участников рынка. Но для моделирования реформируемого ОРЭ Украины невозможно применить уже готовое решение. Причинами этого являются специфика правил функционирования ДДБР и диспетчеризации, особенности других информационных систем в работе энергосистемы (АСКУЭ, системы управления рынком и других), с которыми необходимо взаимодействие модели, широкий спектр задач для исследования конкурентной модели рынка и др. Но для моделирования украинского энергорынка все-таки возможно адаптировать уже существующие подходы зарубежных ученых.

Принципы построения агентной имитационной модели динамики функционирования ОРЭ Украины. Модель бизнес-процесса функционирования рынка «на сутки вперед» и функционирования в реальном времени может быть представлена в нотации BPMN [11] следующим образом (рис. 1). Это описание удобно использовать для построения правил взаимодействия агентов, моделирующих участников рынка.

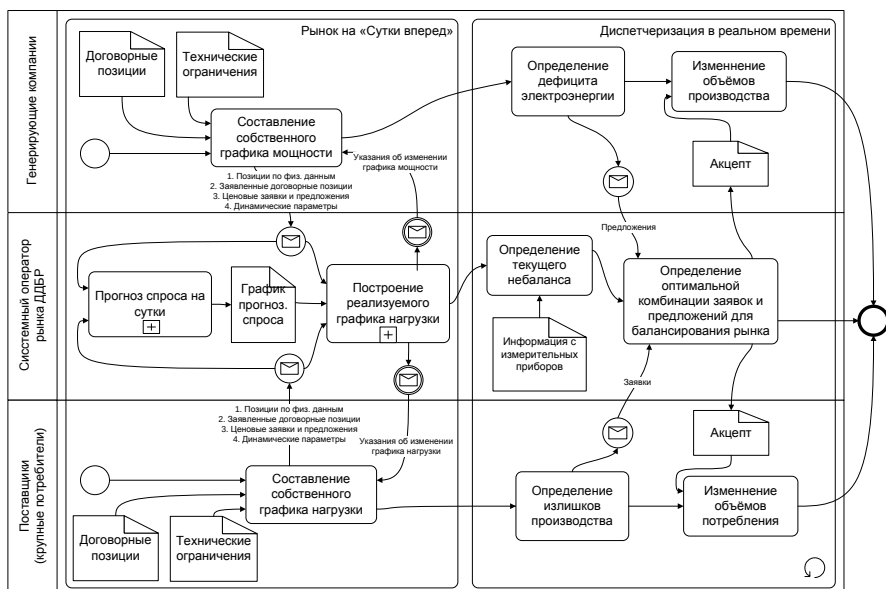


Рис. 1. Описание процесса функционирования балансирующего рынка

Состояние модели динамики функционирования ОРЭ изменяется в дискретные моменты времени согласно правилам функционирования ДДБР.

Для украинского ОРЭ необходимо выделить различные типы агентов для моделирования системного оператора, коммерческого оператора, генерирующих компаний, поставщиков, квалифицированных потребителей. Им соответствуют следующие типы агентов: агент-диспетчер, финансовый агент, агент-генератор, агент-поставщик, агент-потребитель.

Агент-диспетчер, являясь ключевым агентом модели, осуществляет регистрацию заявок и предложений агентов генераторов и поставщиков, составляет общий прогноз потребления в системе, решает задачу построения реализуемого графика нагрузки, контролирует текущий небаланс и выдает команды для балансирования системы. Главным критерием функционирования является минимизация затрат на балансирование производства и потребления электроэнергии в энергосистеме.

Финансовый агент осуществляет распределение финансовых потоков в энергосистеме согласно установленным правилам, осуществляет расчет цен.

Агенты-генераторы заключают прямые договора на поставку электроэнергии с агентами-потребителями, составляют собственный график производства на плановый период, участвуют в балансировании системы путем подачи заявок и предложений на изменение уровня производства. Критерии – прибыль и надежность.

Агенты-поставщики заключают прямые договора на поставку электроэнергии с агентами-генераторами, составляют собственный график потребления на плановый период, участвуют в балансировании системы путем подачи заявок и предложений по изменению уровня потребления. Главный критерий – уменьшение затрат для обеспечения внутреннего спроса.

В предлагаемой модели адаптивными агентами являются агент-диспетчер, агенты-генераторы и агенты-потребители. Для обучения системного оператора целесообразно применять комбинацию генетического алгоритма обучения и обучения с поддержкой, а для агентов-генераторов и агентов-потребителей достаточно обучения с поддержкой [7].

Например, каждый адаптивный агент может выбирать свое действие из некоторого множества допустимых действий M . Если n -й агент выбрал в момент времени t действие k_n и получил при этом выгоду $R(x)$, то он изменяет свое предпочтение в выборе j -го действия согласно следующей формуле:

$$s_{nj}(t+1) = (1-\phi) \cdot s_{nj}(t) + \begin{cases} R(x) \cdot (1-\varepsilon), & j = k \\ s_{nj}(t) \cdot \frac{\varepsilon}{M-1}, & j \neq k \end{cases}, \quad (1)$$

где $s_{nj}(t)$ - предпочтение в выборе j -го действия в момент t ;

ϕ, ε - параметры, отображающие степень обновления предпочтений и степень разнообразия выбираемых действий, соответственно.

Агенты выбирают k -е действие со следующей вероятностью:

$$p_{nk}(t+1) = \frac{s_{nk}(t)}{\sum_{j=1}^M s_{nj}(t)}. \quad (2)$$

Таким образом, вероятность выбора действия, которое принесло большую выгоду, увеличивается.

Основные взаимодействия между агентами отображают правила функционирования балансирующего рынка. Агент-диспетчер запрашивает информацию о графиках нагрузки участников рынка, их заявках и предложениях для участия в балансирующем рынке. Далее он составляет прогноз спроса на следующие сутки и строит реализуемый график нагрузки, выдавая участникам рынка команды по коррекции уровней потребления и производства. Осуществляет контроль баланса при функционировании системы в реальном времени и осуществляет коррекцию дисбаланса. По окончании суток настает этап фактических расчетов, в котором финансовый агент проводит расчеты между остальными агентами; генераторы и потребители пересчитывают собственные предпочтения.

Удобным инструментом для реализации агентной модели является библиотека RePast .NET [12], которая содержит такие важные компоненты, как параллельный дискретный планировщик по времени, среду для визуализации модели и адаптивные средства поведения.

Выводы. Главными задачами создания имитационной модели конкурентного ОРЭ Украины являются изучение динамики функционирования рынка, исследование возможностей участников рынка по максимизации собственной прибыли, изучение механизмов диспетчеризации, рассмотрение вопросов ценообразования на балансирующем рынке. Модель может применяться для апробации и тестирования алгоритмического и программного обеспечения информационной системы управления функционированием ОРЭ.

Возможно расширение модели для изучения взаимодействия между энергосистемами смежных государств, учета аварийных ситуаций в энергосистеме (например, функционирование в режиме "плановых" отключений электроэнергии).

Список литературы: 1. Концепція функціонування та розвитку оптового ринку електричної енергії України – Постанова кабінету міністрів України від 16 листопада 2002 р. № 1789. 2. Левінгтон І. Головні принципи архітектури нового ринку та переходу до нього // <http://www.nerc.gov.ua/document/74567/29.09.08-Lewington.zip>. 3. F. Sensfu, M. Ragwitz, D. Most. Agent-based simulation of electricity markets – A literature review // Working Paper Sustainability and Innovation №5, 2007. 4. Борщев А.В. Практическое агентное моделирование и его место в

арсенале аналитика // Exponenta Pro. Математика в приложениях. - 2004. № 3/4. С. 38-47. 5. Atkins K., C. Barret, C. Homa. Marketecture: A simulation based framework for studying experimental deregulated power markets. 6. Koesrindartoto D., Tesfatsion L. 'Testing the reliability of FERC'S Wholesale Power Market Platform: An agent-based computational economics approach.' // In Proceedings of USAEE/IAEE North American Conference, Washington D.C. July 8-10. 7. I. Erev, A. Roth. Predicting How People Play Games: Reinforcement Learning in Experimental Games with Unique, Mixed Strategy Equilibria. // American Economic Review. - 1998. № 88, p. 848-881. 8. Ortiz-Boyer D., Hervás-Martínez C., García-Pedrajas N.A. Crossover operator for evolutionary algorithms based on population features. // Journal of Artificial Intelligence Research, №24 - 2005, p. 1-48. 9. North M. 'Multi-Agent Social and Organizational Modeling of Electric Power and Natural Gas Markets'. // Computational & Mathematical Organization Theory, vol. 7, 2001, p. 331-337. 10. Conzelmann G., M. North., G. Boyd. Agent-Based Power Market Modeling: Simulating strategic market behavior using an agent-based model-ling approach. // 6th IAEE European Energy Conference, Zurich, 2004. 11. BPMN Specification. // <http://www.bpmn.org/Documents/OMGFinalAdoptedBPMN1-0Spec06-02-01.pdf>. 12. J. Vos, M. North. Repast .NET. // Proceedings of the Agent 2004 Conference on Social Dynamics: Interaction, Reflexivity and Emergence, Chicago, 2004.

Поступила в редакцию 19.03.09

УДК 338.2

М.Д. ГОДЛЕВСКИЙ, д-р техн. наук, проф., зав. каф. АСУ НТУ «ХПИ»,
Э.Е. РУБИН, канд. техн. наук, доцент НТУ «ХПИ»

ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕМ И РАЗВИТИЕМ ХОЛДИНГА НА ОСНОВЕ КЛЮЧЕВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

В статті проводиться аналіз основних проблем в задачах розподілених ієрархічних систем та огляд моделей управління ефективністю підприємств. Розроблені принципи управління функціонуванням та розвитком холдингу на основі ключових показників ефективності.

В статье рассматривается анализ основных проблем в задачах распределенных иерархических систем и обзор моделей управления эффективностью предприятия. Разработаны принципы управления функционированием и развитием холдинга на основе ключевых показателей эффективности.

The article analyzed the major problems in tasks of distributed hierarchical systems and review the models of effectiveness of company management. The principles of holding management and function was developed and based by key performance indicators.

Введение. Почему в наше время столь необходима целостная модель измерения и управления эффективностью функционирования и развития предприятия? Логично предположить, что современные организации уже классифицировали свои системы измерения эффективности. Ведь всем известно, что «невозможно управлять тем, что нельзя измерить». Поэтому кажется естественным, что любой, кто занимается управлением, имеет уже

установившиеся критерии измерений. А, учитывая то, что люди занимаются управлением на протяжении многих лет, к настоящему времени они, конечно же, должны были уже классифицировать все свои системы измерений. К сожалению, как и во многих других сферах нашей жизни, теория далека от практики. Существует огромное количество организаций, чьи критерии эффективности и системы измерения просто безнадежны. Множество организаций внедрило критерии эффективности, которые ведут к совершенно неверному поведению.

Принципы построения модели управления эффективностью предприятия. В данной статье в качестве объекта исследования рассматривается холдинг. Он относится к классу больших технико-экономических систем, управление функционированием и развитием которых невозможно в настоящее время без использования системного анализа, программно-целевого планирования, идеологии системной оптимизации [1,2].

Холдинг содержит в себе множество разнородных дочерних предприятий. Основными особенностями такой системы являются: распределенность функционирования, многоуровневая структура, большое количество входной и выходной информации, слабая формализуемость. Все это говорит о необходимости использования интегрированной автоматизированной системы управления, которая должна охватывать как уровень холдинга так и отдельных дочерних предприятий.

Рассмотрим основные процессы, на основе которых строится и применяется система измерения эффективности. Первый связан с разработкой критериев. Сюда входит понимание того, что необходимо измерять, и определение того, как это необходимо делать. Второй связан с подготовкой к внедрению системы измерения. Это планирование процесса доступа к необходимым данным, построение системы измерения, разработка конфигурации обработки и распределения данных и (самый ответственный момент) преодоление тревоги и беспокойства людей. Третий процесс представляет собой работу по управлению на основе критериев, то есть практическую работу с критериями, когда данные измерений используются для понимания того, что происходит в организации, и как это понимание применить для усовершенствования эффективности бизнеса. И, наконец, остается еще работа по управлению самой системой измерения путем ее регулярного обновления и совершенствования, а также наблюдение за тем, чтобы критерии всегда соответствовали целям организации [3].

Разработка критериев является сложной задачей. Неправильно разработанные критерии могут вызывать нежелательное или несоответствующее поведение людей, измерять цель не в полной мере, неоднозначно интерпретироваться и т.д. Для проверки критериев предлагается использовать десять тестов [4]:

1) тест на достоверность: «Измеряем ли мы на самом деле то, что хотим измерить?»;

2) тест на направленность: «Измеряем ли мы только лишь то, что хотим измерить?»;

3) тест на уместность: «Правильный ли это критерий фактора эффективности, который мы хотим отследить?»;

4) тест на логичность: «Будет ли сбор данных всегда происходить одинаково, независимо от того, кто собирает данные?»;

5) тест на доступность: «Легко ли определить местонахождение и собрать данные, необходимые нам для проведения измерений?»;

6) тест на ясность: «Не исключена ли возможность неоднозначной интерпретации результатов?»;

7) тест «А что потом?»: «Могут и будут ли выполняться определенные действия в соответствии с полученными данными?»;

8) тест на своевременность: «Можно ли обращаться к данным и получать их так быстро и так часто, как это необходимо для принятия соответствующих мер?»;

9) тест на затраты: «Стоит ли критерий тех затрат, которые связаны с его измерением?»;

10) тест на игры: «Может ли критерий стимулировать нежелательное или несоответствующее поведение?».

В мировой практике существуют различные модели управления эффективностью деятельности компании. Нужно отметить, что они отличаются друг от друга по принципу построения критериев и ориентированы на различных пользователей. К таким моделям управления эффективностью относятся:

1) Система сбалансированных показателей;

2) Система добавленной экономической стоимости;

3) Модель Европейского фонда управления качеством;

4) Призма эффективности;

5) Панель управления.

Наиболее универсальной системой, учитывающей взаимодействие всех заинтересованных сторон, является Призма эффективности. Она основана на трех фундаментальных положениях.

Во-первых, для организаций неприемлемо или даже невозможно концентрироваться исключительно на нуждах одной или нескольких заинтересованных сторон в бизнесе (обычно это акционеры и клиенты), если они хотят выжить и преуспевать на долгосрочной основе.

Во-вторых, стратегия, процессы и возможности организации должны быть согласованы между собой и связаны друг с другом, если она стремится занять наиболее выгодное положение и приносить реальную выгоду всем заинтересованным сторонам.

В-третьих, организация и заинтересованные в ней стороны должны признать, что их отношения являются взаимно обязывающими.

Заинтересованные стороны должны осуществлять вложения в организацию, рассчитывая взамен на адекватные ответные действия.

Таким образом, Призма эффективности состоит из 5 ракурсов: удовлетворение заинтересованных сторон, вклад заинтересованных сторон, стратегии, процессы, возможности. Чтобы удовлетворить свои собственные желания и потребности, организации должны добиться определенного вклада от вовлеченных заинтересованных сторон. Обычно в виде капитала или кредита от инвесторов, лояльности и прибыли от клиентов, идей и профессионализма от работников, материалов и услуг от поставщиков и т. д. Им также необходимо определить, какой стратегии они будут придерживаться, чтобы гарантировать интерес вовлеченных сторон. Для внедрения таких стратегий нужно понимать, какие процессы важны для предприятия, и действовать одновременно эффективно и рационально. Процессы сами по себе могут выполняться, только если у организации есть для этого соответствующие возможности: определенное сочетание квалифицированных кадров, наилучших практик, ведущих технологий и физической инфраструктуры.

Центральным звеном процесса управления развитием предприятия является целевое управление, так как именно оно позволяет направить деятельность компании на достижение глобальных целей и управлять развитием предприятия. Традиционно при целевом управлении выделяют такие элементы как миссия, видение, стратегические целевые приоритеты [5].

Для построения модели управления функционированием и развитием предприятия целесообразно использовать методологии всеобщего менеджмента качества и бенчмаркинга. Согласно методологии бенчмаркинга при формировании критериев управления развитием холдинга на различных уровнях иерархической системы предлагается использовать информацию об эталонных образцах. В качестве базовых критериев будем использовать квадраты степени отклонения текущего целевого состояния от эталонного.

В основе грамотного управления функционированием и развитием холдинга лежит рациональное распределение ресурсов между его структурными составляющими на различных уровнях иерархии. Введем понятия базовых ресурсов на уровнях подразделений, предприятий и управляющей компании (УК). Базовые ресурсы формируются по заранее заданному алгоритму. Кроме этого, вводится понятие двух типов точек входа финансовых и других видов ресурсов. Первый тип – основные счета холдинга. Второй тип – субсчета предприятий.

Выделим основные задачи, которые решаются на каждом уровне управления.

1. Уровень подразделения. Решается задача оптимального распределения ресурсов между отдельными целями и задачами подразделения.

2. Уровень предприятия. Решается оптимизационная задача, которая соответствует использованию финансовых ресурсов предприятия в двух направлениях:

а) оптимальное распределение финансов между различными видами ресурсов, которые находятся в компетенции предприятия;

б) координация функционирования отдельных подразделений предприятия на основе оптимального (рационального) распределения ресурсов между ними.

3. Уровень УК. Решаются две оптимизационные задачи, которые соответствуют использованию финансовых ресурсов холдинга (на верхнем уровне иерархии) в двух направлениях:

а) оптимальное распределение финансов между различными видами ресурсов, которые находятся в компетенции управления управляющей компании;

б) координация функционирования отдельных предприятий на основе рационального распределения ресурсов между ними [6].

Принципы управления функционированием и развитием холдинга.

Будем считать принятыми следующие положения, которые связаны с разработкой технологии управления развитием холдинга.

1. Управление холдингом осуществляется на плановом периоде $[1, T]$. Решается задача управления функционированием и развитием холдинга для каждого t -подпериода планового периода $[1, T]$.

2. Холдинг состоит из множества структурных единиц $S^t, s \in S^t$: управляющая компания, множество предприятий $I^t \subset S^t$, множество подразделений i -го предприятия – $J_i^t \subset S^t, i \in I^t$.

3. Под термином «процесс» будем подразумевать ключевой процесс холдинга, который критически важен для успешной реализации его стратегии.

Построение системы управления функционированием и развитием холдинга состоит из следующих этапов:

Этап 1. Построение модели Призма эффективности в отношении стратегических целевых приоритетов холдинга для реализации стратегии и контроля «узких мест» холдинга;

Этап 2. Построение модели оптимального распределения ресурсов между структурными единицами холдинга на периоде $[1, T]$ для достижения стратегических целевых приоритетов холдинга.

Этап 1.

1. Согласно модели Призмы эффективности необходимо определить список заинтересованных сторон, относительно которых будет строиться стратегия холдинга (инвесторы, клиенты, сотрудники, поставщики и др.).

2. Принимается множество видов ресурсов Φ (люди, технологии, инфраструктура, практические методы), которые должны быть в поле компетенции всех структурных единиц холдинга.

3. Строятся цели согласно модели Призмы эффективности. На уровне УК строятся множества целей TSS (удовлетворенность заинтересованных сторон) и TSC (вклад заинтересованных сторон). На уровне структурных единиц холдинга строятся множества целей $TS_s, s \in S^t$ (стратегии). Для каждого процесса структурной единицы $s \in S^t$ определяется цель $tp \in TP_s^t$ (процесс), степень достижения которой определяет качество выполнения процесса, где TP_s^t – множество процессов структурной единицы $s \in S^t$. Выполнение целей из множества $TP_s^t, s \in S^t$ обеспечивается вложением ресурсов (инвестиций) из множества Φ , направленных на улучшение процессов. Для каждой цели $tp \in TP_s^t$ строится множество подцелей TC_{tp} (возможности), которые определяют цели по обеспеченности процесса множеством ресурсов Φ .

4. Согласно модели Призма эффективности вводится множество ключевых показателей эффективности (КПЭ) $K_C^t, c \in C^t$ для реализации поставленных целей, где

$$C^t = TSS \cup TSC \cup \left(\bigcup_{s \in S^t} TS_s \right) \cup \left(\bigcup_{s \in S^t} TP_s^t \right).$$

Каждый КПЭ $k \in K_C^t$ измеряется в n_k квантах времени t -го подпериода периода $[1, T]$.

Для каждого $k \in K_C^t$ в кванте времени $\tau^k \in [1, n_k]$ рассчитывается его фактическое значение $kpi_k^t(\tau_k)$, принимается эталонное значение $\overline{kpi}_k^t(\tau_k)$ и минимальное значение $\underline{kpi}_k^t(\tau_k)$, где $\underline{kpi}_k^t(\tau_k) \leq kpi_k^t(\tau_k) \leq \overline{kpi}_k^t(\tau_k)$.

5. Для каждого $k \in K_C^t$ вводится критерий:

$$\overline{\omega}_k^t = \sum_{\tau_k=1}^{n_k} \delta_k^{\tau_k} \omega_k^t(\tau_k), \quad \sum_{\tau_k=1}^{n_k} \delta_k^{\tau_k} = 1, \quad \delta_k^{\tau_k} > 0, \quad \tau_k \in [1, n_k], \quad k \in K_C^t.$$

где $\omega_k^t(\tau_k) = \left(\overline{kpi}_k^t(\tau_k) - kpi_k^t(\tau_k) \right)^2 / \left(\overline{kpi}_k^t(\tau_k) - \underline{kpi}_k^t(\tau_k) \right)^2, \quad \tau_k \in [1, n_k], \quad k \in K_C^t;$

$\delta_k^{\tau_k}$ – важность кванта времени τ_k КПЭ $k \in K_C^t$.

6. Пусть относительная важность КПЭ $k \in K_C^t$ определяется весовыми коэффициентами λ_k^t . Тогда получим значение критерия, определяющего степень достижения цели $c \in C^t$ в t -м подпериоде периода $[1, T]$:

$$\hat{\omega}_c^t = \sum_{k \in K_C^t} \lambda_k^t \bar{\omega}_k^t, \sum_{k \in K_C^t} \lambda_k^t = 1, \lambda_k^t > 0, k \in K_C^t, c \in C^t.$$

$$\hat{\omega}_c^t = \sum_{k \in K_C^t} \lambda_k^t \bar{\omega}_k^t, \sum_{k \in K_C^t} \lambda_k^t = 1, \lambda_k^t > 0, k \in K_C^t, c \in C^t.$$

Этап 2.

7. Пусть A^t – множество источников поступления финансов на уровень УК, $\bar{A}_i^t$ – множество источников поступления финансов на уровень i -го предприятия. Тогда считаются известными:

- а) $\{P_\alpha^t, \alpha \in A^t, t \in [1, T]\}$ – прогноз объемов финансовых ресурсов, поступающих на уровень УК;
- б) $\{\bar{P}_{i\alpha}^t, \alpha \in \bar{A}_i^t, i \in I^t, t \in [1, T]\}$ – прогноз объемов финансовых ресурсов, поступающих на уровень предприятий.

В соответствии с прогнозом объемов финансовых ресурсов поступающих на уровень УК и предприятия формируются базовые финансовые ресурсы УК, предприятий и подразделений в соответствии с некоторыми заданными заранее алгоритмами $\bar{A}^t, \hat{A}_i^t, \tilde{A}_{ij}^t$:

- 1) на уровне УК: $\bar{R}^t = \bar{A}^t(\{P_\alpha^t, \alpha \in A^t\}, \{\bar{P}_{i\alpha}^t, \alpha \in \bar{A}_i^t, i \in I^t\})$;
- 2) на уровне предприятия: $\hat{R}_i^t = \hat{A}_i^t(\{P_\alpha^t, \alpha \in A^t\}, \{\bar{P}_{i\alpha}^t, \alpha \in \bar{A}_i^t\})$, $i \in I^t$;
- 3) на уровне подразделений: $\tilde{R}_{ij}^t = \tilde{A}_{ij}^t(\{P_\alpha^t, \alpha \in A^t\}, \{\bar{P}_{i\alpha}^t, \alpha \in \bar{A}_i^t\})$, $j \in J, i \in I^t$.

8. Находим финансовые ресурсы $\{R_c^\alpha, \varphi \in \Phi\}$, которые необходимо выделить для достижения эталонных значений КПЭ $k \in K_C^t$.

9. Введем управляющие переменные, которые используются на соответствующих уровнях иерархии:

- финансовые ресурсы x_c^α , которые вкладываются в ресурс $\varphi \in \Phi$ для достижения цели $c \in TP_s^t$ в t -м периоде.
- финансовые ресурсы, выделяемые i -м предприятием j -му подразделению для решения задачи координации, обозначим y_{ij}^t .
- финансовые ресурсы, выделяемые УК i -му предприятию для решения задачи координации, обозначим z_i^t .

10. Введем следующие подмножества: $\overline{TP}_0^t \subset TP^t$ – множество целей (процессы) уровня УК, $\hat{TP}_i^t \subset TP^t$ – множество целей (процессы) i -го предприятия, $\tilde{TP}_{ij}^t \subset TP^t$ – множество целей (процессы) j -ого подразделения i -го предприятия, где

$$TP^t = \bigcup_{s \in S^t} TP_s^t = \overline{TP}_0^t \cup \left(\bigcup_{i \in I^t} \hat{TP}_i^t \right) \cup \left(\bigcup_{i \in I^t} \bigcup_{j \in J_i^t} \tilde{TP}_{ij}^t \right)$$

Исходя из введенных базовых и дополнительных финансовых ресурсов, для каждой структурной единицы холдинга имеют место следующие ограничения:

– на уровне УК:

$$\sum_{i \in I^t} z_i^t + \sum_{c \in \overline{TP}_0^t} \sum_{\varphi \in \Phi} x_c^{\varphi} \leq \bar{R}^t;$$

– на уровне предприятий:

$$\sum_{j \in J_i^t} y_{ij}^t + \sum_{c \in \hat{TP}_i^t} \sum_{\varphi \in \Phi} x_c^{\varphi} \leq \hat{R}_i^t + z_i^t, i \in I^t;$$

– на уровне подразделений:

$$\sum_{c \in \tilde{TP}_{ij}^t} \sum_{\varphi \in \Phi} x_c^{\varphi} \leq \tilde{R}_{ij}^t + y_{ij}^t, j \in J_i^t, i \in I^t.$$

11. Так как не имеет смысла выделять финансы, которые перекроют уровень эталона хотя бы по одному виду ресурса, то имеет место следующее ограничение:

$$0 \leq x_c^{\varphi} \leq R_c^{\varphi}, \varphi \in \Phi, c \in TP_s^t.$$

12. Для определения степени достижения целей $TC_s^t, c \in TP_s^t$ используются критерии обеспеченности целей ресурсами $\varphi \in \Phi$ в t -подпериоде планового периода $[1, T]$:

$$w_c^{\varphi} = (R_c^{\varphi} - x_c^{\varphi})^2 / (R_c^{\varphi})^2.$$

13. Для определения степени достижения целей TP_s^t используются критерии обеспеченности ресурсами $\varphi \in \Phi$ ключевых процессов структурных единиц $s \in S$ в t -подпериоде планового периода $[1, T]$:

$$\hat{w}_c^t(x_c^{\alpha}) = \sum_{\varphi \in \Phi} \rho_c^{\alpha} w_c^{\alpha}(x_c^{\alpha}), \sum_{c \in TP_s^t} \rho_c^{\alpha} = 1, \rho_c^t > 0,$$

где $x_i^t = \{x_i^{\alpha}, \varphi \in \Phi\}$, а ρ_i^{α} – степень важности обеспеченности φ -м ресурсом.

14. Целью управления функционированием и развитием холдинга является достижение целей $c \in TP_s^t$ каждой структурной единицей холдинга $s \in S^t$. Критериями локальных задач на всех уровнях управления являются обобщенные критерии $\hat{w}_c^t(x_c^{\alpha})$ обеспеченности ресурсами $\varphi \in \Phi$ целей $c \in TP_s^t$.

15. Целью горизонтальной координации локальных задач нижних уровней управления является получение компромиссных решений, обеспечивающих одинаковые отклонения от оптимальных решений по всем критериям соответствующих локальных задач с учетом их весовых коэффициентов.

16. Цель вертикальной координации – формирование таких решений задачи управления функционированием и развитием холдинга, которые обеспечивают одинаковую степень достижения эталонов ресурсов на каждом из трех уровней управления с учетом их весовых коэффициентов.

Заключение. Таким образом, в данной статье были сформулированы принципы управления функционированием и развитием холдинга, представляющего собой 3-уровневую иерархическую структуру. Система управления функционированием и развитием холдинга основывается:

1) на модели «Призма эффективности» в отношении стратегических целевых приоритетов холдинга и его структурных единиц, а также для проведения диагностики реализации стратегии и определения «узких мест» холдинга;

2) на модели оптимального распределения ресурсов между структурными единицами холдинга.

Список литературы: 1. Волкович В. Л., Коленов Г. В. Метод распределенного решения взаимосвязанных оптимизационных задач // Техническая кибернетика. – 1990. – № 6. 2. Глушков В. М. О системной оптимизации // Кибернетика. – 1980. – № 5. 3. R. S. Kaplan, D. Norton. Using the Balanced Scorecard as a Strategic Management System. – USA: Harvard Business Review, 1996. 4. Э. Нилл, К. Адамс, М. Кеннерли. Призма эффективности. Карта сбалансированных показателей для измерения успеха в бизнесе и управления им. – Днепропетровск: ООО «Баланс-Клуб», 2003. 5. Особенности разработки корпоративной стратегии // Финансовый директор. – 2005. – № 1. 6. Годлевский М. Д. RPD–алгоритмы системной оптимизации развивающихся систем в задачах линейного программирования большой размерности // Кибернетика. – 1990. – № 2.

Поступила в редколлегию 05.03.08

А. О. ЦУМАНЕНКО, студентка НТУ «ХПІ»

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРАТЕГІЇ КОНКУРЕНТНОЇ ПЕРЕВАГИ БАНКУ НА ПІДСТАВІ ВИКОРИСТАННЯ ЕКОНОМІКО МАТЕМАТИЧНИХ МЕТОДІВ

В статті пропонується розгляд здатності позичальника повернути кредит як головного параметра стратегії конкурентної переваги банку. Розглядається метод багатфакторної регресії як найкращий спосіб побудови моделі, що прогнозується благонадійність позичальника.

В статье предлагается рассмотрение способности заемщика вернуть кредит как главного параметра стратегии конкурентного превосходства банка. Рассматривается метод многофакторной регрессии как наилучший способ построения модели, прогнозируемой благонадежность заемщика.

Consideration of ability of borrower to return a credit as a main parameter of strategy of competition superiority of bank is offered in the article. The method of multivariable regression as the best method of construction of model, forecast reliability of borrower is examined.

Вступ. Банки всього світу мають на озброєнні всі можливі й неможливі засоби завоювання конкурентної переваги. На цій підставі існує стільки розробок стратегій конкуренції, скільки конкуруючих банківських філій. Проте, відкидаючи всі нюанси, можна виділити три основні стратегічні підходи до ведення конкурентної боротьби [1]:

1. Прагнення мати найнижчі у галузі виробничі витрати (стратегія керівної ролі в галузі виробничих витрат);

2. Пошук шляхів диференціації вироблюваних послуг відносно послуг конкурентів (стратегія диференціації).

3. Фокусування на вузькій частині, а не на всьому ринку послуг (стратегія фокусу, або ніші).

Постановка завдання дослідження. На основі теоретичного дослідження представлених стратегій виявлено, що основою конкурентної переваги українського банку є вживання особливих методів концентрації при обслуговуванні цільової ринкової ніші кредитних послуг. Найпоширенішим є споживчий кредит, який надається фізичним особам на придбання споживчих товарів тривалого користування та послуг і який повертається у розстрочку.

Головними параметрами споживчого кредиту є [1]:

- доступність кредиту;
- величина відсоткової ставки;
- строки надання і погашення;
- здатність позичальника повернути кредит.

Під банківським контролем можуть знаходитись усі параметри, крім одного – здатності позичальника повернути кредит.

З одного боку, банку необхідно ретельно перевіряти клієнта перед ухваленням рішення о видачі або не видачі кредиту. А з іншого боку дана процедура має бути дуже короткою. Тобто для конкурентної переваги на ринку кредитних послуг банку необхідні якість і швидкість рішення, що приймається.

Саме тому здатності позичальника повернути кредит є найцікавішим для досліджень в умовах конкурентної боротьби.

Використання скорингу. Перший алгоритм для оцінки потенційного позичальника був запропонований ще в 1941 році Девідом Дюраном. До того ж часу можна віднести появу терміну "кредитний скоринг", що означає складну математичну систему визначення міри платоспроможності позичальника, засновану на аналізі декількох характеристик клієнта [2]. Завдання скорингу - не лише виявити потенційно неплатоспроможного клієнта, але і прискікти діяльність шахраїв, спочатку не плануючих повертати кредит. Алгоритми роботи скоринг-системи повинні залишатися конфіденційною інформацією, оскільки при здобутті таких даних зловмисники, теоретично, можуть вказати "правильні" дані при оформленні заявки і "обдурити" систему. Подібне програмне забезпечення дало нові можливості для обслуговування клієнтів. Окрім вже згадуваного скорочення терміну обробки клієнтських даних, стало можливим, наприклад, відмовити клієнтові в тому або іншому кредитному продукті і відразу ж запропонувати альтернативний варіант (з меншою сумою або на тяжчих умовах), відповідною розрахованому показнику платоспроможності.

Скорингові системи використовують статистичні методи роботи, а значить, потребують масиви вихідних даних про раніше видані кредити (вибірку) для виявлення залежностей. Наприклад, для виявлення міри впливу сімейного стану на повернення кредиту. Можна скористатися вже зібраною кимось іншим базою даних або використовувати методи, що вимагають для коректного вживання менших за об'ємом масивів дослідних даних. Перший спосіб властивий в першу чергу при розробці банками власних рішень.

Класичний підхід до скорингу передбачає ухвалення позитивного рішення про видачу кредиту в тому випадку, якщо вихідний показник перевищує якийсь критичний поріг. А вихідний показник обчислюється як сума чисельних характеристик параметрів (вік, кількість утриманців, дохід, наявність кредитної карти і т. д.), помножених на відповідну "вагу" (значущість показника в загальній оцінці). Регресійний аналіз залишається найпоширенішим методом, що використовується в скорингу.

Саме тому проблема вирішувалась за допомогою розробки багатofакторної регресійної моделі на підставі анкетних даних клієнта. Розглянуто 5 типів анкет з даними різної специфікації. На основі яких збудовані регресійні моделі.

Порівняльний аналіз моделей за всіма дослідженими анкетами наведений нижче у таблиці.

Порівняльний аналіз моделей

Параметри порівняння	Розрахунки моделі за даними анкет				
	№1	№2	№3	№4	№5
Стандартна помилка	0,3974	0,3962	0,4916	0,4326	0,2865
Коефіцієнт кореляції	0,7393	0,6777	0,3133	0,6181	0,9073
Коефіцієнт детермінації	0,5465	0,4593	0,0981	0,3821	0,8232
Скорегований коефіцієнт детермінації	0,3424	0,3467	—	0,2209	0,6581
Адекватність моделі за тестом Фішера	Адекватна	Не адекватна	Не адекватна	Не адекватна	Адекватна
Наявність автокореляції за тестом Дарбіна-Уотсона	Не можемо зробити висновки про наявність або відсутність автокореляції	—	—	—	Автокореляція відсутня
Наявність гетероскедастичності за тестом Спірмана	Модель гомоскедастична	—	—	—	Модель гомоскедастична
Наявність мультиколінеарності за F-тестом Глаубера і Ферра	У факторах моделі виявляється мультиколінеарність	—	—	—	У факторах моделі виявляється мультиколінеарність

Виходячи з результатів аналізу, більш вдалою за приведеними показниками адекватності є остання поширена модель, яка була збудована на даних анкети №5. Тому для подальшого дослідження під розгляд попадає саме вона.

Отже наявність мультиколінеарності в останній моделі наштовхує на визначення рівня колінеарності. Для цього розраховуємо величину дисперсійно-інфляційного фактора VIF (variance inflationary factor) для кожної змінної:

$$VIF_i = \frac{1}{1 - R_i^2}, \quad (1)$$

Дослідники використовують значення $VIF = 10$ як критичне. Якщо $VIF \leq 10$, то можна стверджувати про недостатність зв'язку між i -м фактором і всіма іншими. Якщо $VIF \geq 10$, то це свідчить про наявність мультиколінеарності. Згідно цього тестування у моделі прослідковується недостатній зв'язок між факторами, тобто даним рівнем колінеарності можна знехтувати.

Отже модель адекватна та її можна використовувати для прогнозу залежної змінної. Припустимо, що нам відомі значення факторів у $(n+k)$ -й період, тоді ми можемо отримати прогнозне значення y'_{n+k} за моделлю

$$y'_{n+k} = b_0 + b_1 x_{1,n+k} + \dots + b_p x_{p,n+k}, \quad (2)$$

якщо розглядається результат по позиції, задається змінна у зі значеннями 1 і 0, де 1 означає, що відповідний позичальник розплатився по кредиту, а 0, що мав місце дефолт. Однак тут виникає проблема: можливість появи моделі із пророкуючими значеннями, що є більшими 1 і меншими 0 [2]. Але такі значення взагалі не припустимі для первісної задачі. Для рішення цієї проблеми вираховується інтервал довіри залежної змінної, де порогове значення контролюється згідно з політикою банку.

Теорія прогнозування дає змогу отримати точкові та інтервальні прогнозні значення. У випадку бінарної залежної треба використовувати інтервальні прогнозні значення. В залежності від зовнішніх обставин буде змінюватись рівень граничного значення.

Висновки. З проведеного аналізу різноманітних анкет були зроблені висновки:

1. Для розробки регресійної моделі, яка буде застосовуватись у скорингу, потрібно зважувати якнайбільше факторів, що характеризують позичальника. Тобто питання анкети повинні бути багатотиповими та правильно специфікованими. Багатогранність інформації позитивно впливає на адекватність побудованої моделі.

2. Можливість появи моделі із пророкуючими значеннями, що є більшими 1 і меншими 0 вирішується обчисленням інтервалу довіри залежної змінної. У такий спосіб порогове значення обчисленого інтервалу може змінюватись в залежності від зовнішніх обставин та суб'єктивних точок зору.

Тобто використання багатфакторної регресійної моделі найточніше вирішує проблему оцінки благонадійності позичальника й тим самим підвищує рівень конкурентної переваги банку.

Список літератури: 1. *Фатхутдинов Р. А.*, Конкурентоспособность: экономика, стратегия, управление.— М.: ИНФРА-М, 2000. 2. *Малхорта, Нэреш. К.* Маркетинговые исследования. Практическое руководство 3-е.: Пер. с англ. — М.: Издательский дом «Вильямс».2002.

Поступила в редколлегию 27.02.09

Ю. В. КОНОХОВА, аспирантка НТУ «ХПИ»

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ КАПИТАЛА СТРАХОВОЙ КОМПАНИИ С УЧЕТОМ ДОХОДА ОТ РАЗМЕЩЕНИЯ РЕЗЕРВОВ

В статті пропонується модель, що описує процес розміщення страхових резервів з урахуванням інфляції, надійності об'єктів розміщення, а також нормативних обмежень.

В статье предлагается модель размещения страховых резервов с учетом уровня инфляции и надежности объектов размещения.

In the paper the model of insurer's reserves is suggested, taking into account inflation, reliability of objects of investing and normative limitations of investing.

Введение. Анализ и оптимизация процессов функционирования страховой компании должен основываться на учете взаимосвязи страхового и инвестиционного видов деятельности страховщика. Непосредственно страховая деятельность направлена на предоставление страхователям страховой защиты. Она включает в себя сбор страховых платежей, формирование страховых резервов и выплату страховых возмещений. Финансовая деятельность страховой компании включает в себя управление средствами компании, и в первую очередь - страховыми резервами. Исследования в области инвестиционной деятельности страховых компаний требуют рассмотрения процесса формирования капитала страховщика с учетом как его страховой, так и финансовой деятельности. Цель настоящей работы состоит в исследовании финансово-инвестиционной деятельности страховщика, а именно, в построении математической модели формирования капитала с учетом дохода от размещения резервов с учетом надежности вложений, инфляции и нормативных ограничений.

Постановка задачи разработки модели формирования капитала с учетом размещения резервов страховой компании. Процесс формирования капитала страховщика включает в себя ряд этапов. На первом этапе потоки поступающих страховых платежей аккумулируются в компании, при этом динамика изменения капитала страховой компании может быть описана как:

$$K(T) = SP(T) + K(T - 1), \quad (1)$$

где $SP(T)$ - объем собранных за период страховых премий;

$K(T - 1)$ - капитал компании на предыдущем этапе.

Из совокупного потока поступивших страховых платежей компания должна выплатить государственный сбор, зарезервировать сумму,

необходимую для оплаты расходов компании как юридического лица и сформировать страховые резервы и, в первую очередь, резерв незаработанных премий (обязательный) и резерв предупредительных мероприятий, катастроф, колебаний убыточности (необязательный). Объемы резервов рассчитываются согласно «Методике формирования и размещения страховых резервов» [1, 2]. В общем виде весь объем страховых резервов может быть описан как:

$$Rz = SP \cdot (1 - \eta l - \mu l), \quad (2)$$

где ηl - доля объема поступлений, выплачиваемая в качестве налогов;

μl - доля общего объема поступлений страховых платежей, которая должна быть направлена на обеспечение функционирования компании.

Одной из основных задач страховщика является оптимальное размещение страховых резервов, что позволяет компании значительно снизить плату за страхование и формировать резервы с учетом прибыли от размещения. Снижение платы за страхование в этом случае приводит к повышению спроса на страховые услуги и привлечению страхователей, вследствие чего страховой портфель становится более сбалансированным.

Как известно, вложения любой компании могут носить инвестиционный или спекулятивный характер. Однако в случае размещения резервов в рисковом страховании компания практически не использует собственно инвестирование из-за низкой ликвидности инвестиционного капитала. Естественнo предположить, что размещая резервы, финансовые управляющие компании предпочтут спекулятивные вложения, а именно, банковские вклады (депозиты), недвижимое имущество, ценные бумаги, банковские металлы.

Фактически задача размещения резервов сводится к определению долей общего резерва, размещаемых в тот или иной объект инвестирования. Формально это может быть представлено как

$$Rz = \sum_{j=1}^n \Theta_j \cdot Rz, \quad \sum_{j=1}^n \Theta_j = 1, \quad n = 4 \quad (3)$$

где Θ_1 - доля резервов, размещенных в банковских вкладах (депозитах),

Θ_2 - доля резервов, инвестированных в недвижимость,

Θ_3 - доля резервов, размещенных ценные бумаги предприятий,

Θ_4 - доля резервов, вложенных в покупку банковских металлов.

При принятии решения об объекте размещения резервов сравнивают ожидаемую прибыль от вложений в данный объект, с прибылью от других, альтернативных объектов.

Модель выбора портфеля размещения страховых резервов. Как уже указывалось, страховые резервы размещаются в основном в спекулятивные объекты. Расчет прибыли спекулятивных видов вложений проводится теми

же методами, что и при инвестиционном анализе. Одним из наиболее часто используемых показателей, используемых при выборе объекта инвестирования, является показатель NPV [3]. Однако для каждого из видов вложений существуют свои особенности.

Объем приведенной прибыли от размещения средств на депозитах определяется по формуле:

$$NPV1 = \sum_{j1=1}^{J1} DX_{j1} \cdot \left(1 + \frac{r_{j1} - g}{1 + g}\right) \cdot p_{j1} - \sum_{j1=1}^{J1} DX_{j1}, \quad (4)$$

где DX_{j1} - сумма, размещенная на депозите $j1$,

r_{j1} - ставка, под которую размещена сумма на депозите $j1$,

g – темп инфляции,

p_{j1} – вероятность того, что выплата по вкладу $j1$ будет осуществлена.

Будем считать, что выплата осуществляется в том случае, если компания не обанкротится, то есть выплачивает депозиты или дивиденды по акциям. Это предположение вводится с целью увязывания безопасности вложения средств с международными стандартами надежности финансовых учреждений. Поскольку страховщики обязаны размещать свои резервы только в тех учреждениях, которые имеют утвержденный международными агентствами (например, Moody's и Standard & Poor's) рейтинг надежности, то вероятность того, что компания, в которой страховщик разместил резервы, не обанкротится, можно считать априорно заданной [4].

Объем приведенной прибыли от вложения средств в покупку недвижимости равен

$$NPV2 = \sum_{j2=1}^{J2} B_{j2} \cdot (1 - g) + \sum_{j2=1}^{J2} BY_{j2} \cdot \left(\frac{1 - g}{1 + g}\right) - \sum_{j2=1}^{J2} BX_{j2} - \sum_{j2=1}^{J2} \tilde{B}_{j2} \cdot (1 - g_i), \quad (5)$$

где B_{j2} - доход от использования объекта недвижимости $j2$,

BY_{j2} - сумма, за которую объект $j2$ может быть продан,

BX_{j2} - сумма, вложенная в покупку объекта недвижимости $j2$,

$\tilde{B}_{j2}$ - сумма, затраченная на обслуживание объекта недвижимости $j2$,

Объем приведенной прибыли от размещения средств в ценные бумаги:

$$NPV3 = \sum_{j3=1}^{J3} A_{j3} \cdot (1 - g) \cdot p_{j3} - \sum_{j3=1}^{J3} AX_{j3} + \sum_{j3=1}^{J3} AY_{j3} \cdot \frac{1 - g}{1 + g} \quad (6)$$

где A_{j3} - дивиденды по пакету ценных бумаг $j3$,

P_{j3} – вероятность того, что выплата по пакету ценных бумаг $j3$ будет осуществлена,

AX_{j3} -стоимость пакета ценных бумаг $j3$,

AY_{j3} – стоимость, по которой пакет $j3$ может быть реализован.

Сумма приведенной прибыли от вложения средств в банковские металлы:

$$NPV4 = \sum_{j4=1}^{J4} CY_{j4} \cdot \frac{1-g}{1+g} - \sum_{j4=1}^{J4} CX_{j4}, \quad (7)$$

где CY_{j4} – стоимость продажи банковских металлов $j4$,

CX_{j4} – стоимость покупки банковских металлов $j4$.

Таким образом, получив значения объема приведенной прибыли от вложения средств, руководство компании может принять решение о том, как наилучшим образом разместить страховые резервы. Фактически, решение о структуре размещения резервов сводится к нахождению такого соотношения долей размещения (Θ_j), которое бы максимизировало сумму NPV :

$$NPV = \sum_{j=1}^n NPV_j \cdot \Theta_j \rightarrow \max \quad (8)$$

Помимо прибыли от размещения резервов существуют и нормативные ограничения [2, 5]. Ограничения эти заданы в виде граничных значений долей всего объема резервов, размещаемых в каждое из направлений. Для разрабатываемой модели данную информацию можно представить в виде вектора Θ , где $\Theta1$ - доля резервов, размещенных в банковских вкладах (депозитах), $\Theta1 \leq 0,7$, $\Theta2$ - доля резервов, инвестированных в недвижимость, $\Theta2 \leq 0,2$, $\Theta3$ - доля резервов, размещенных ценные бумаги предприятий, $\Theta3 \leq 0,4$, $\Theta4$ - доля резервов, вложенных в покупку банковских металлов, $\Theta4 \leq 0,1$.

Для недопущения чрезмерного риска в системе страхования с целью защиты интересов страхователей и поддержания способности страховых организаций в любой момент обеспечить выплату по своим обязательствам устанавливается следующий норматив ликвидности [5,6]:

$$NLa = \frac{\Theta1 \cdot Rz + \Theta3 \cdot Rz + \alpha \cdot Rz}{Rz}, \quad NLa \geq 0,2 \quad (9)$$

где Rz - сумма сформированных страховых резервов,

α - доля наличных средств на текущем счете и остаток в кассе. Устанавливается для каждого предприятия отдельно [6].

Таким образом, задача формирования портфеля размещения страховых резервов сводится к задаче нахождения максимума целевой функции (8) при наличии системы ограничений и решается методами линейного программирования.

Окончательно капитал компании с учетом дохода от размещения страховых резервов определяется разностным уравнением:

$$K(T) = \sum_{j=1}^J Rz(T-1) \cdot \Theta_j \cdot (1 + d_j) \cdot (1 - g) + K(T-1), \quad (10)$$

где $K(T-1)$ - капитал компании в период $(T-1)$;

$Rz(T-1)$ - объем страховых резервов, сформированных в периоде $(T-1)$,

Θ_j - доля размещения страховых резервов в периоде $(T-1)$ в объект j ,

d_j - доходность объекта вложения резервов j в периоде $(T-1)$,

g - темп инфляции в период $(T-1)$.

Выводы. Таким образом, в статье были описаны и проанализированы финансовые потоки, возникающие в процессе формирования капитала страховой компании, а также при распределении этого капитала. Кроме того, эти потоки были формализованы, и получено уравнение модели динамики изменения капитала страховщика с учетом доходов от вложения резервов. Анализ полученной модели с учетом факторов неопределенности позволит оценить доходность и риск вложения резервов и сформировать оптимальную стратегию их размещения с учетом существующих нормативных ограничений.

Список литературы: 1. Закон України "Про страхування" (85/96-ВР). 2. "Правила формування, обліку та розміщення страхових резервів за видами страхування, іншими, ніж страхування життя" затверджені розпорядженням Держфінпослуг від 17.12.2004 N 3104. 3. *Шарп У., Александер Г., Бэйли Дж.*, ИНВЕСТИЦИИ, пер.с англ.- М.: ИНФРА-М, 2001-ХІІ, 1028с. 4. *Малыгин В., Смородинская Н.* Рейтинговая индустрия и международные рейтинговые агентства. – Банковские услуги. 1998, № 4. 5. Положення "Про критерії та нормативи достатності капіталу, диверсифікованості та якості активів страховика" затверджені розпорядженням Держфінпослуг N 1378 від 04.08.2008 р. 6. Положення про ведення касових операцій в національній валюті України, затверджене Постановою Правління НБУ від 15.12.2004 р. № 637.

Поступила в редколлегию 27.02. 09

А.А. КЛИМЕНКО, аспирант НТУ «ХПИ»,
Л.Г. РАСКИН, д-р. техн. наук профессор НТУ «ХПИ»

ПРОБЛЕМА «ЛЕЧЕНИЯ ОСОБЕЙ-ИНВАЛИДОВ» ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ПОПУЛЯЦИЙ В ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМАХ

Рассмотрен возможный негативный результат операции скрещивания при формировании популяции в генетическом алгоритме. Предложена простая процедура «лечения особей-инвалидов». Приведен пример, иллюстрирующий методы «лечения».

Розглянуто ймовірний негативний результат операцій схрещування при формуванні популяцій в генетичному алгоритмі. Запропонована проста процедура «лікування особин-інвалідів». Наведений приклад, який ілюструє методи «лікування».

The possible negative result of forming crossing operation of populace is considered in a genetic algorithm. The simple procedure of «treatment of individuals-invalids» is offered. An example, illustrating the methods of «treatment», is resulted.

Введение. Большое число проблем экономики, техники, социологии, медицины и др., сводится к однотипной математической задаче отыскания экстремума функции многих переменных, с учетом большого числа ограничений. Совокупность этих задач образует специфический класс математического программирования. Отыскание решения многих из этих задач сводится к комбинаторному перебору возможных вариантов. Предложенные Холландом [1] генетические алгоритмы – современный и эффективный инструмент решения переборных задач или задач, к ним сводящихся. Генетический алгоритм реализует специфическую процедуру отыскания наилучшего решения, которая во многом аналогична эволюции живых организмов в природе. Работа генетического алгоритма начинается с формирования множества допустимых вариантов решений задачи (в терминах, введенных Холландом, каждый вариант решения называется особью, а их множество – популяцией). В дальнейшем осуществляется многократное итерационное повторение следующих операций:

- проверяется критерий останова;
- анализируются созданные на предыдущей итерации варианты решения задачи, и осуществляется отбор заданного числа лучших;
- лучшие особи предыдущей популяции используются для формирования новой популяции.

Быстродействие генетического алгоритма в существенной степени зависит от эффективности процедуры формирования особей при образовании популяции на каждом шаге работы алгоритма. Дело в следующем. Каждая особь в новой популяции является результатом воздействия специфических

операторов генетического алгоритма (в частности, скрещивания и мутации) на генетические коды особей предыдущей популяции. При решении многих конкретных задач никаких специальных требований к формируемым при этом особям не предъявляются. Рассмотрим, например, задачу полиномиальной аппроксимации развивающегося во времени одномерного процесса, наблюдаемого на некоторой совокупности моментов времени $(T_1, T_2, \dots, T_n)$. Пусть наблюдаемые значения процесса образуют набор $(y_1, y_2, \dots, y_n)$. Введем модель процесса в виде полинома выбранной степени d :

$$y(t) = a_0 + a_1 t + \dots + a_d t^d. \quad (1)$$

Задача состоит в отыскании набора неизвестных коэффициентов в уравнении регрессии (1), которые наилучшим образом (например, в смысле наименьших квадратов) описывают процесс. Эта задача сводится к отысканию вектора $A^T = (a_1, a_2, \dots, a_d)$, минимизирующего функционал.

$$J = (H \cdot A - Y)^T (H \cdot A - Y),$$

где

$$H = \begin{pmatrix} 1 & T_1 & T_1^2 & \dots & T_1^d \\ 1 & T_2 & T_2^2 & \dots & T_2^d \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & T_n & T_n^2 & \dots & T_n^d \end{pmatrix}, \quad Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix}.$$

Генетический алгоритм легко справляется с этой задачей. При этом особь представляет собой набор из $(d+1)$ генов, каждый из которых определяет значение соответствующего элемента вектора A . Понятно, что никакие ограничения на значения коэффициентов a_i , $i = 0, 1, \dots, d$, не накладываются. Иначе дело обстоит в оптимизационных задачах с ограничениями. Пусть, например, рассматривается задача рационального распределения некоторого одномерного ресурса, расходуемого при изготовлении n типов.

Введем:

x_j – планируемое для изготовления количество изделий j -го типа, $j = 1, 2, \dots, n$;

$\varphi_j(x_j)$ – прибыль, получаемая от реализации x_j изделий j -го типа, $j = 1, 2, \dots, n$;

a_j – значение ресурса, расходуемого при изготовлении одного изделия j -го типа, $j = 1, 2, \dots, n$;

C - заданное значение суммарного расходуемого ресурса.

Тогда задача состоит в отыскании набора значений ресурса, выделяемого для изготовления изделий $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, максимизирующего

$$F(x) = \sum_{j=1}^n \varphi_j(x_j) \quad (2)$$

и удовлетворяющего ограничениям

$$\sum_{j=1}^n a_j x_j = c, \quad (3)$$

$$x_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

При решении этой задачи с применением генетического алгоритма каждая особь в популяции задает набор переменных, удовлетворяющий ограничениям (3), (4). Понятно, что в результате проведения операции скрещивания формируемые при этом новые особи ограничению (3) удовлетворять не будут. Таким образом, появляются особи, в терминологии Холланда – «инвалиды», которые не могут быть использованы при решении задачи. Понятно, что возникающая при этом проблема носит общий характер и является характерной особенностью огромного числа различных задач. Решение проблемы возможно одним из следующих способов.

Первый состоит в использовании специальных приемов преобразования задачи таким образом, чтобы обеспечить реализацию безопасного, с точки зрения возможного появления «инвалидов», проведения операции скрещивания. В частности, при решении и общей задачи математического программирования применение метода штрафных функций переводит исходную задачу условной оптимизации в безусловную. При этом «здоровые» особи популяции при скрещивании дают заведомо «здоровое» потомство.

Второй путь состоит в том, чтобы в случае возникновения при очередном скрещивании особи-«инвалида», повторять эту операцию до появления «здоровой»-особи.

Третий путь – разработка конкретных приемов «лечения инвалидов» применительно к каждой решаемой задаче.

Простой анализ перечисленных способов обеспечения нормального функционирования генетического алгоритма дает возможность сделать следующие выводы. Первый путь носит общий характер, поэтому эффективность его применения существенно зависит от формирования решаемой задачи. Второй путь может быть полезен лишь для ограниченного числа задач, в которых множество возможных вариантов решения невелико. В связи с этим наиболее перспективен – третий путь.

Цель статьи – разработка эффективного метода «лечения инвалидов» для конкретной комбинаторной задачи коммивояжера.

Постановка задачи. Как известно [2] задача коммивояжера состоит в отыскании замкнутого кратчайшего маршрута обхода без петель заданного числа пунктов. Формальная постановка задачи имеет вид [3]: найти булеву матрицу $x = (x_{ij})$, доставляющую минимум линейной форме:

$$L(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} x_{ij},$$

переменные которой удовлетворяют ограничениям:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

$$n_i - n_j + nx_{ij} \leq n - 1, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, n.$$

Здесь

n - число пунктов;

x_{ij} - расстояние между пунктами (i, j) ;

x_{ij} - индикатор, равный единице, если в маршруте есть звено, непосредственно соединяющее пункты (i, j) , и равный нулю в противном случае.

При решении этой задачи генетическим алгоритмом особь представляет собой набор генов-чисел, номер каждого из которых соответствует номеру шага в маршруте обхода пунктов, а численное значение определяет номер пункта посещаемого на очередном шаге. Понятно, что результатом скрещивания двух особей будет особь-«инвалид», задающая маршрут, в котором некоторые пункты будут повторяться дважды, а другие – вообще отсутствовать. Поставим задачу построения процедуры быстрого «лечения инвалидов», возникающих в результате проведения операции скрещивания.

Основные результаты. Предлагаемая процедура лечения очень проста, ее смысл и содержание целесообразно проиллюстрировать на примере.

Пусть число пунктов обхода $n = 8$. Каждую особь представим в виде матрицы, строки которой пронумерованы в порядке шагов маршрута, а столбцам соответствуют номера пунктов. Элементы этой матрицы – единицы и нули, причем если элемент $a_{ij} = 1$, то это означает, что на i -м шаге маршрута посещается j -й пункт. На рис. 1 приведен возможный вариант маршрута $N1$ и $N2$. Соответствующие этим маршрутам особи представлены на рис. 2.

	1	2	3	4	5	6	7	8
1		1						
2				1				
3							1	
4	1							
5			1					
6								1
7					1			
8						1		

Вариант маршрута N1

	1	2	3	4	5	6	7	8
1				1				
2								1
3							1	
4						1		
5					1			
6	1							
7			1					
8		1						

Вариант маршрута N2

Рис. 1. Варианты маршрутов N1 и N2

2	4	7	1	3	8	5	6
---	---	---	---	---	---	---	---

Особь, задающая маршрут
N1(первый родитель)

4	8	7	6	5	1	3	2
---	---	---	---	---	---	---	---

Особь, задающая маршрут N2
(второй родитель)

Рис. 2. Особи, задающие маршруты N1 и N2

Будем считать, для простоты, что операция скрещивания реализует одноточечный кроссовер. В результате скрещивания получим два потомка, представленных на рис. 3, 4.

2	4	7	1	5	1	3	2
---	---	---	---	---	---	---	---

Особь-потомок N1

4	8	7	6	3	8	5	6
---	---	---	---	---	---	---	---

Особь-потомок N2

Рис. 3. Особи-потомки N1 и N2

Оба потомка – «инвалиды». Действительно в маршруте, соответствующем потомку N1, пункты N1 и N2 посещаются дважды, а пункты N6 и N8 в нем отсутствуют. Приведем матрицы, представляющие маршруты, получаемые в результате скрещивания.

	1	2	3	4	5	6	7	8
1		1						
2				1				
3							1	
4	1							
5					1			
6	1							
7			1					
8		1						

Потомок 1

	1	2	3	4	5	6	7	8
1				1				
2								1
3							1	
4						1		
5			1					
6								1
7					1			
8						1		

Потомок 2

Рис. 4. Матрицы, соответствующие маршрутам для потомков N1 и N2

В матрице для потомка 1 столбцы 1 и 2 содержат по две единицы, а столбцы 6 и 8 их не содержат. В матрице для потомка N2 по две единицы содержат столбцы 6 и 8, а столбцы 1 и 2 их не содержат. Для «лечения каждого инвалида» предлагается следующая двухэтапная процедура. На первом этапе в матрице-потомке отыскиваются столбцы, содержащие две единицы и нулевые столбцы. На втором этапе «лишние» единицы из столбцов первой группы перемещаются в столбцы второй группы.

Результат применения этой процедуры для приведенных выше матриц-потомков представлен на рис. 5, а излеченные особи – на рис. 6.

	1	2	3	4	5	6	7	8
1		1						
2				1				
3							1	
4	1							
5					1			
6						1		
7			1					
8								1

	1	2	3	4	5	6	7	8
1				1				
2								1
3							1	
4						1		
5			1					
6		1						
7					1			
8	1							

Рис. 5. Матрицы, соответствующие маршрутам для излеченных потомков N1 и N2

2	4	7	1	5	6	3	8
---	---	---	---	---	---	---	---

Особь – излеченный потомок N1

4	8	7	6	3	2	5	1
---	---	---	---	---	---	---	---

Особь – излеченный потомок N2

Рис. 6. Результат применения процедуры «лечения инвалидов»

Выводы. Таким образом, предложена простая и эффективная процедура «лечения инвалидов», возникающих в результате применения операции скрещивания при получении популяции в генетическом алгоритме решения задач коммивояжера. Приведен пример применения процедуры для случая, когда при скрещивании использовался одноточечный кроссовер. Понятно, что эта же процедура может быть реализована и при скрещивании с многоточечным кроссовером.

Список литературы: 1. John Holland. Genetic algorithms and the optimal allocation of trials. SIAM Journal on Computation, 2: p. 88-105, 1973. 2. Литтл Дж. Алгоритм для решения задачи о коммивояжере : Пер. с англ. / Дж. Литтл., К. Мурти, Д. Суини, К. Кэрел / «Экономика и математические методы», 1965, - т.1, №1. – с. 34-42. 3. Корбут А.А. Дискретное программирование / А.А. Корбут, Ю.Ю. Финкельштейн. – М.: Наука, 1969. – 288 с.

Поступила в редколлегию 23.03.09

А. С. САМОКИШ, студент НТУ «ХПИ»,
Н. А. МАРЧЕНКО, канд. техн. наук, доцент НТУ «ХПИ»

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ РАННЕЙ ДИАГНОСТИКИ ОНКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАБОЛЕВАНИЙ

Стаття присвячена викладу методів діагностики онкологічних захворювань, розглянуті основні методи діагностики, виділені їх особливості. Зроблена спроба підвищити чутливість виявлення раку використанням нейронної мережі.

Статья посвящена изложению методов диагностики онкологических заболеваний, рассмотрены основные методы диагностики, выделены их особенности. Сделана попытка повысить чувствительность обнаружения рака использованием нейронной сети.

Article is dedicated to methods of diagnostics of oncological diseases, reviewed the main methods of diagnosis. An attempt was made to increase the sensitivity of cancer detection using a neural network.

Введение. Термография как один из методов неинвазивного обследования существовала в Украине в начале 1980-х годов [1], но распространение магниторезонансной, компьютерной томографии и ультразвукового исследования (УЗИ) привели к спаду использованию термодиагностики. В настоящее время в связи с появлением нового класса термографов [2] и микроволновых радиотермометров вновь появился интерес к этому методу обследования.

Не зависимо от выбора метода обследования интерпретация результатов и постановка диагноза являются главной задачей диагностики. Для автоматизации постановки диагноза требуется выбрать необходимые параметры обследования и алгоритм, который будет обладать максимальной специфичностью и чувствительностью. Таким образом, идеальный метод диагностики должен, во-первых, не пропускать ни одного действительно больного человека и, во-вторых, не делать ошибочных заключений.

Онкологические заболевания занимают второе место в списке причин смертности. Одно из главных направлений, в котором сейчас идут работы – это диагностика рака молочной железы.

Постановка задачи. В данной статье поставлена цель: определить эффективный алгоритм обработки результатов термодиагностики для автоматизации постановки диагноза.

Методика диагностики. Метод термодиагностики основан на получении температурной карты и определении областей термоаномалий и наличия термоасимметрии. Главная особенность диагностики рака молочной железы в том, что молочные железы являются парными органами. Следовательно, выявление термоасимметрии может указывать на наличие заболевания.

Известно [3], что удельное тепловыделение в опухоли прямо пропорционально скорости ее роста, т.е. быстро растущие опухоли имеют повышенную температуру по сравнению со здоровой тканью. Так же следует учитывать, что на диагностику может влиять структура желез, различные формы рака и наличие не онкологических заболеваний и то, что с возрастом у женщин внутренняя температура молочных желез понижается [4]. Следовательно, из выше перечисленных особенностей можно выделить ряд характерных признаков, которые можно будет сопоставить с результатами традиционных методов диагностики.

В рамках исследования [5], разработчики радиотермометра РТМ-01-РЭС, проанализировали большинство термограмм пациенток уже с установленными диагнозом рака молочной железы и выделили следующие признаки наличия заболевания.

1. Повышенное максимальное значение температуры соска по сравнению со средней температурой молочной железы:

$$p_1 = t_c - \sum_{i=1}^{N-1} \frac{t_i}{N-1}, \quad (1)$$

где $t_c = t_0$ – температура соска, первый элемент массива температур;

t – массив температурных точек молочной железы;

N – количество температурных точек.

2. Повышенная разница температур сосков правой и левой молочной железы:

$$p_2 = |tr_c - tl_c|, \quad (2)$$

где $tr_c = tr_0$ – температура правого соска;

$tl_c = tl_0$ – температура левого соска.

3. Повышенное максимальное значение разности температур между симметричными точками левой и правой молочных желез:

$$p_3 = \max \left\{ |tr_i - tl_i| \right\} \quad (3)$$

где tr_i – температура точки правой молочной железы;

tl_i – температура точки левой молочной железы;

$i = [0..N)$ – индекс массива температуры.

4. Повышенное среднеквадратичное значение разностей температур между симметричными точками левой и правой молочной железы:

$$p_4 = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^N (tr_i - tl_i)^2}{N}}, \quad (4)$$

5. Повышенное среднеквадратичное значение разностей температур между симметричными точками левой и правой молочной железы и средней температуры всех точек обследования:

$$p_5 = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^N (\Delta t_i - \overline{t_m})^2}{N}}, \quad (5)$$

где $\Delta t_i = tr_i - tl_i$ – разница температур между симметричных точек;

$$\overline{t_m} = \frac{\sum_{i=0}^N \Delta t_i}{N} \text{ – средняя температура всех точек обследования.}$$

6. Повышенное среднеквадратичное значение в одной из молочной желез и средней температурой всех точек обследования, при этом выбирается большее из двух значений:

$$p_6 = \max \left\{ \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^N (tr_i - \overline{t_m})^2}{N}}, \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^N (tl_i - \overline{t_m})^2}{N}} \right\}. \quad (6)$$

В экспертной системе «РТМ-диагностика» [5], полученный результат обследования отображают на двухмерном графике, где на абсциссе представляют соотношение температуры соска и средней температуры молочной железы, а на оси ординат один из выше перечисленных признаков. Точками на графике (см. рис. 1) обозначены уже верифицированные значения, т.е. которые в результате дополнительной диагностики выявили рак. Совокупность данных точек образует, так называемую «область риска», при попадании в которую экспертная система делает заключение наличия рака по текущему признаку. При этом заявленная чувствительность экспертной системы лишь по одному признаку составляет 60-75% и при учете всех признаков повышается до 90% при специфичности не менее 75%.

Окончательная же установка диагноза лежит на субъективной оценки врача, основываясь на показаниях экспертной системы и дополнительной информации полученной при обследовании. Стоит отметить, что именно

дополнительная информация существенно может вносить поправки в трактовку результатов экспертной системы.

Поскольку взаимосвязь определенных параметров может быть не очевидной для установки диагноза, будет целесообразно данную экспертную систему дополнить нейронной сетью.

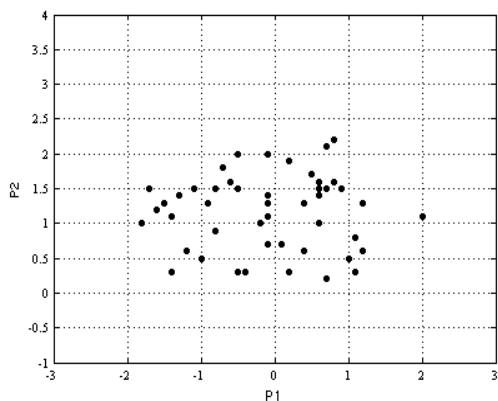


Рис. 1. График области верифицированных значений по двум признакам

Для решения данной задачи посредством системы MATLAB была создана нейронная сеть прямого распространения [6] с одним скрытым слоем. Кроме перечисленных выше признаков, входными данными для нейронной сети могут быть возраст, объем молочной железы, особенности ее формы и средняя температура с аксиллярных точек.

Данные о возрасте были взяты с анкет обследований экспертной системе [5] и температуру с аксиллярных точек, которые измеряют как контрольные показания для построения термокарты. Выборка была разделена на три группы, первая группа численностью 70% для обучения сети, вторая группа 15% для верификации и оставшиеся 15% для проверки.

Обучение нейронной сети проводилось методом масштабируемых сопряженных градиентов, основанном на вычислении второй производной целевой функции. На рис. 2 представлен процесс обучения, отношение среднеквадратичной ошибки к количеству эпох. Наилучшая точка, при которой была минимальная среднеквадратичная ошибка, обозначена на графике.

Численная характеристика ошибок проверки нейронной сети была получена с помощью функции `plotconfusion`, результатом которой является матрица неточностей (см. рис. 2).

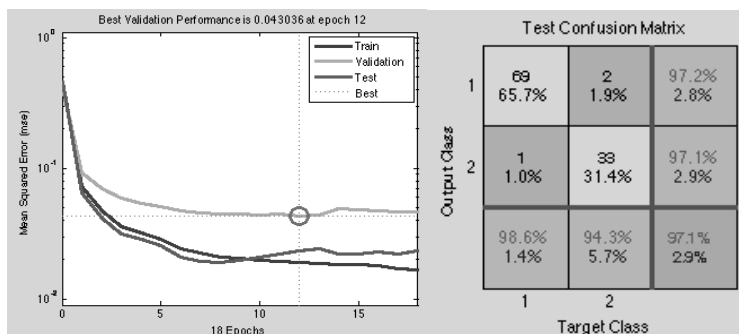


Рис. 2. Среднеквадратичная ошибка при обучении сети и матрица неточностей

Точность результатов тестирования нейронной сети составила 97,1%, что превышает чувствительность экспертной системы [5], основанной на проверке полученных новых значений к принадлежности «области риска». Конечно, применение нейронной сети может сделать не очевидной сделанное заключение и затруднит интерпретацию результатов, но совместное использование экспертной системы [5] и нейронной сети повышают эффективность метода диагностики.

Выводы. Главной особенностью применения нейронной сети для принятия решения о наличии рака, является то, что основываясь на тех же данных что и экспертная система [5] точность выявления рака оказалась выше. Введение дополнительных параметров, может еще больше повысить чувствительность метода, но проверить это можно лишь клиническими исследованиями.

Таким образом, термодиагностика как неинвазивный метод обследования может занять достойное место в медицинской практике как средство обнаружения рака на ранней стадии.

Список литературы: 1. Розенфельд Л. Г. Основы клинической дистанционной термодиагностики. – К.: Здоров'я, 1988. – 224 с. 2. Заболотный Д.И., Розенфельд Л.Г., Колотилев Н.Н. Новые возможности дистанционной инфракрасной термографии в оториноларингологии // Журнал ушных, носовых і горлових хвороб.– №5.– С. 2-5. 3. Carr K.L. Microwave Radiometry: it's Importance to the Detection of Cancer. IEEE, vol. 37 №12 Dec. 1989 4. Рахлин В.Л., Алова С.Е. Радиотермометрия в диагностике патологии молочных желез, гениталий, предстательной железы и позвоночника.– Препринт.– №253.– Горький, НИРФИ.– 1988. 5. Рожкова Н.И., Смирнова Н.А., Назарова А.А. Факторы, влияющие на эффективность радиотермометрических измерений молочной железы с помощью диагностического комплекса РТМ-01-РЭС.– «Опухоли женской репродуктивной системы».– №3.– 2007.– С. 21–25. 6. Дьяконов В., Круглов В. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник.– СПб.: Питер, 2001.

Поступила в редколлегию 12.02.09

Ю.И. ДОРОФЕЕВ, канд. техн. наук, доцент НТУ «ХПИ»,
А.Д. ЧАЙКА, студент НТУ «ХПИ»

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НЕМИНИМАЛЬНО- ФАЗОВЫМИ ОБЪЕКТАМИ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Розглядається задача управління немінімально-фазовою системою. Запропонований регулятор складається із багат шарової нейронної мережі та ПІД-регулятора. Нейроконтролер адаптивно змінює управляючі сигнали ПІД-регулятора таким чином, щоб виходи об'єкта з немінімально-фазовою характеристикою відстежували виходи мінімально-фазової еталонної моделі на кожному кроці. Результати моделювання підтверджують ефективність запропонованого методу для управління немінімально-фазовим об'єктом із запізненням.

Рассматривается задача управления неминимально-фазовой системой. Предложенный регулятор состоит из многослойной нейронной сети и ПИД-регулятора. Нейроконтроллер адаптивно изменяет управляющие воздействия, вырабатываемые ПИД-регулятором, так, чтобы выходы объекта с неминимально-фазовой характеристикой следовали за выходами минимально-фазовой эталонной модели в каждый момент времени. Результаты моделирования доказывают эффективность предложенного метода для управления неминимально-фазовым объектом с запаздыванием.

The problem of control of a nonminimum phase system is considered. The proposed controller has a hybrid architecture of a multilayer neural network and the PID controller. The neurocontroller adaptively transforms a control action of the PID controller to follow the system outputs with the nonminimum phase characteristic to those of a reference model with a minimum phase characteristic in each sampling instant. Computer simulation results show that the proposed method effectively controls the nonminimum phase systems with time delay properties.

Введение. Современные требования к качеству управления сложными объектами приводят к тому, что во многих случаях методы классической теории управления оказываются неэффективными. В этих условиях на первый план выходят так называемые методы интеллектуального управления, которые в настоящее время активно развиваются в четырех взаимосвязанных направлениях:

- адаптивные системы управления;
- системы управления, основанные на знаниях, включая экспертные системы;
- нечеткие системы управления;
- искусственные нейронные сети (ИНС).

Основная цель создания подобных систем – ввести в системы управления гибкость и адаптируемость к непредсказуемым ситуациям, свойственные человеческому интеллекту, вместе с тем избегая ненадежности и нестабильности.

Наиболее перспективным классом интеллектуальных систем управления являются искусственные нейронные сети, представляющие собой системы

параллельной обработки информации, способные к обучению в реальном времени в условиях минимальной априорной информации об объекте управления. При этом объект рассматривается как черный ящик, подвергающийся неизвестным случайным воздействиям. Доступными являются только его входы и выходы. Цель системы управления (СУ) состоит в том, чтобы уже в процессе функционирования определить закон регулирования, обеспечивающий оптимальное поведение объекта.

Постановка задачи. Для описания дискретных динамических систем с постоянными параметрами используются разностные уравнения, представляющие модель системы в пространстве состояний

$$\begin{aligned}x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k), \quad x(0) = x_0, \\y(k) &= Cx(k) + Du(k),\end{aligned}\tag{1}$$

где $x(k) \in \mathbb{R}^n$ – вектор состояний системы в момент времени $k = 0, 1, 2, \dots$,

$u(k) \in \mathbb{R}^m$ – вектор управляющих воздействий,

$y(k) \in \mathbb{R}^p$ – вектор измеряемых выходных переменных,

A, B, C, D – стационарные матрицы соответствующих размерностей.

Такая модель позволяет непосредственно установить связь между значениями выходных и входных переменных объекта в последовательные дискретные моменты времени.

От уравнений (1) можно перейти к описанию системы в частотной области в виде дискретной матричной передаточной функции (ДМПФ). ДМПФ называется минимально-фазовой, если ее нули лежат внутри окружности единичного радиуса комплексной плоскости.

Задача синтеза системы управления для неминимально-фазовых (НМФ) объектов является весьма актуальной, поскольку, как показано К. Остремом [1], при быстром квантовании по времени большинство объектов становится неминимально-фазовыми, независимо от расположения нулей их непрерывной передаточной функции.

Классическая теория управления предлагает множество хорошо разработанных методов синтеза регуляторов в частотной и временной областях для систем вида (1). Однако для управления НМФ системами традиционные методы плохо применимы. Особенности НМФ объектов управления приводят к появлению значительных ошибок управления в момент скачкообразного изменения задающего воздействия либо значительному перерегулированию в течение переходного процесса.

Использование прямых адаптивных методов управления, таких как метод размещения полюсов, также не дает хороших результатов из-за ограничений, присущих линейным регуляторам.

В работе [2] проблема управления НМФ объектом решается с помощью фильтра конечных импульсных характеристик (англ.: finite impulse response filter), который действует как регулятор упреждения. Однако этот метод применим только в случае слежения выхода объекта за периодическим входным сигналом.

В данной работе рассматривается задача структурного и параметрического синтеза системы управления для неминимально-фазового объекта вида (1) с запаздыванием.

Схемы систем управления с искусственными нейронными сетями. Использование ИНС позволяет решать задачу управления НМФ объектом путем создания адаптивной СУ с обучаемым нейроконтроллером. Здесь под обучением подразумевается процесс выработки в СУ желаемой реакции на внешние сигналы путем многократных воздействий на систему и внешней корректировки. Внешняя корректировка осуществляется “учителем”, которому известна желаемая реакция СУ на определенные воздействия. Таким образом, при обучении “учитель” сообщает системе дополнительную информацию о том, верна или неверна ее реакция.

СУ с ИНС можно рассматривать как адаптивные системы, среди которых выделяют системы замкнутого и разомкнутого типов. Под адаптивной СУ замкнутого типа понимают прямое использование входных и выходных сигналов объекта для адаптации управления, без промежуточной идентификации объекта. Существуют также схемы разомкнутых адаптивных СУ с нейрорегулятором объекта управления, который используется для оценки требуемого сигнала управления при заданном выходном состоянии объекта. Наилучшие результаты при управлении НМФ объектами удастся получить при использовании замкнутой нейросетевой системы управления с эталонной моделью, схема которой представлена на рис. 1.

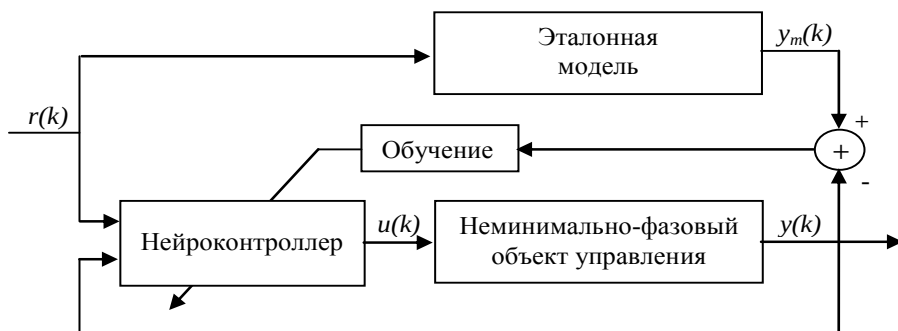


Рис. 1. Замкнутая нейросетевая система управления с эталонной моделью

При такой схеме построения СУ нейроконтроллер расположен между ПИД-регулятором и неминимально-фазовым объектом управления и его

задачей является обеспечение замкнутой СУ в каждый момент времени k таких же динамических свойств, как у эталонной модели, которая является минимально-фазовой. Тогда целью обучения нейроконтроллера является получение ограниченной последовательности управляющих воздействий $u(k)$ для $k \geq 0$ такой, что

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \|y_m(k) - y(k)\| = 0. \quad (2)$$

В этом случае НМФ объект будет отслеживать желаемую траекторию, определенную эталонной моделью.

Выбор архитектуры и обучение нейроконтроллера. Поскольку многослойная нейронная сеть способна аппроксимировать нелинейное преобразование «вход-выход», предлагается использовать ее для синтеза управляющих воздействий в замкнутой системе управления нелинейным динамическим объектом. Нейроконтроллер, который обучается в режиме on-line, должен изменить взаимосвязь между входами и выходами объекта с неминимально-фазовой характеристикой в соответствии с динамикой эталонной модели, которая является минимально-фазовой.

На рис. 2 представлена предложенная схема замкнутой нейросетевой системы управления с эталонной моделью для НМФ объекта. Нейроконтроллер, на вход которого поступает сигнал с ПИД-регулятора, вырабатывает управляющий сигнал, который подается на вход объекта. Параметры нейроконтроллера адаптивно изменяются на каждой итерации в соответствии с алгоритмом обратного распространения ошибки (АОР) так, чтобы выход НМФ объекта следовал за выходом эталонной модели.

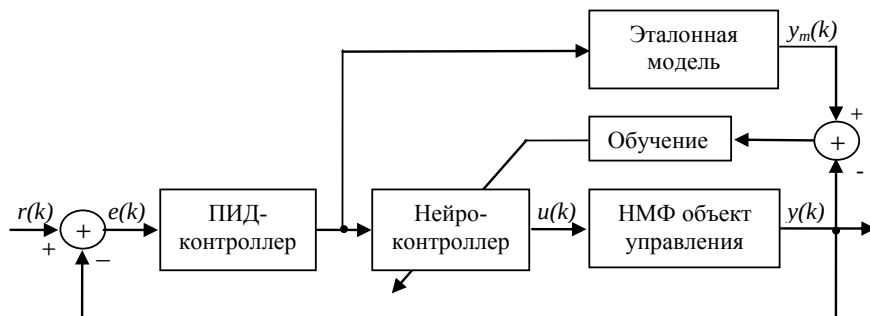


Рис. 2. Замкнутая нейросетевая система управления с эталонной моделью для неминимально-фазового объекта

Целевая функция, которая минимизируется в процессе on-line обучения нейроконтроллера, определяется как квадрат разности между вектором выходов эталонной модели $y_m(k)$ и вектором выходов объекта $y(k)$ в каждый момент времени k :

$$E(k) = \frac{1}{2} \{y_m(k) - y(k)\}^2. \quad (3)$$

В соответствии с методом градиентного спуска, который лежит в основе АОР, на каждой итерации необходимо вычислять частные производные функции $E(k)$ по каждому из настраиваемых параметров нейронной сети $w(k)$:

$$\frac{\partial E(k)}{\partial w(k)} = (y(k) - y_m(k)) \frac{\partial y(k)}{\partial u(k)} \frac{\partial u(k)}{\partial w(k)}. \quad (4)$$

В случае, когда модель объекта точно не известна, второй терм в уравнении (6) не может быть вычислен точно. Вместо него предлагается использовать сигнум отношения разностей двух последовательных значений на входе и выходе объекта, как показано в уравнении (5):

$$\frac{\partial E(k)}{\partial w(k)} \approx (y(k) - y_m(k)) \operatorname{sgn}\left(\frac{\Delta y(k)}{\Delta u(k)}\right) \frac{\partial u(k)}{\partial w(k)}. \quad (5)$$

Нейроконтроллер представляет собой многослойную нейронную сеть с прямым распространением сигнала, которая состоит из входного, нескольких скрытых и выходного слоев. В ходе экспериментов была выбрана следующая архитектура нейронной сети: в выходном слое один нейрон с линейной активационной функцией; во входном слое три нейрона с сигмоидальными активационными функциями; один скрытый слой, состоящий из трех нейронов с сигмоидальными функциями.

Одна итерация работы нейроконтроллера состоит из двух этапов:

- 1) выработка управляющего воздействия (прямое распространение сигнала);
- 2) корректировка весовых коэффициентов нейронной сети (обратное распространение ошибки).

Результаты моделирования. С целью демонстрации эффективности предложенного метода управления рассмотрим следующий пример. Оптимальные динамические характеристики проектируемой системы заданы в виде непрерывной передаточной функции эталонной модели с запаздыванием, равным $T_m = 0,08$ секунды:

$$G_m(s) = \frac{(s+1)e^{-sT_m}}{(s+3)(s+4)}. \quad (6)$$

Объект управления описывается непрерывной передаточной функцией с запаздыванием, равным $T = 0,1$ секунды:

$$G(s) = \frac{(s-1)e^{-sT}}{(s+3)(s+4)}. \quad (7)$$

Таким образом, полюса модели и объекта совпадают, однако при этом объект является неминимально-фазовым, в отличие от эталонной модели. Кроме того, предполагается, что величина запаздывания эталонной модели T_m определена с 20% ошибкой по отношению к величине запаздывания объекта T . Для моделирования элемента запаздывания применяется аппроксимация по Паде третьего порядка.

Поскольку нейроконтроллер функционирует в дискретном режиме, моделирование выполняется также в дискретном времени. Для этого с помощью Z-преобразования перейдем от непрерывных моделей к дискретным с интервалом дискретизации, равным $\Delta t = 0,01$ секунды. Затем осуществляется переход от дискретных передаточных функций к моделям в пространстве состояний. В результате получаем модели вида (1), порядок которых равен 5.

Модель дискретного ПИД-регулятора описывается уравнением

$$G_c(z) = K_p + \frac{K_i}{z-1} + \frac{K_d \cdot (z-1)}{z-\gamma}, \quad (8)$$

где $\gamma = \exp(-1/\Delta t)$, K_p, K_i, K_d – коэффициенты усиления пропорциональной, интегральной и дифференциальной частей соответственно.

Настроим дискретный ПИД-регулятор по эталонной модели методом Циглера-Никольса [3]. Построим замкнутую СУ эталонной моделью с ПИД-регулятором в контуре управления и подадим на вход единичное скачкообразное воздействие. Для экстраполяции непрерывного сигнала применяется экстраполятор нулевого порядка. Результат моделирования представлен на рис. 3.

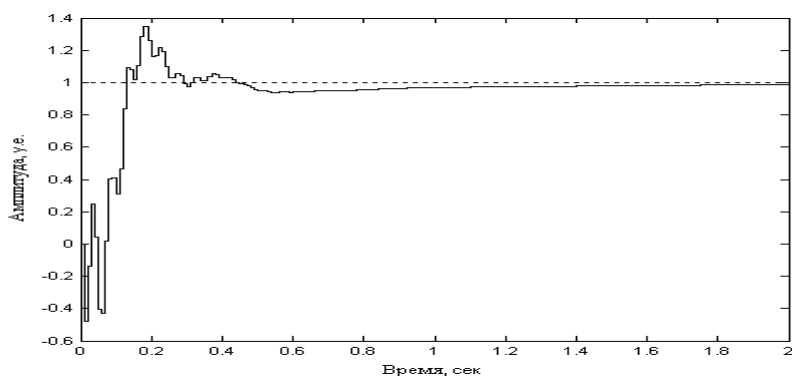


Рис. 3. Переходная характеристика системы управления эталонной моделью с ПИД-регулятором

Анализ графика показывает, что длительность переходного процесса и величина перерегулирования удовлетворяют заданным требованиям. Однако

замена эталонной модели (2) на неминимально-фазовый объект (3) приводит к срыву устойчивости замкнутой системы.

Построим замкнутую СУ с эталонной моделью для НМФ объекта в соответствии со схемой, приведенной на рис. 2, и подадим на вход единичное скачкообразное воздействие. Результаты моделирования представлены на рис. 4.

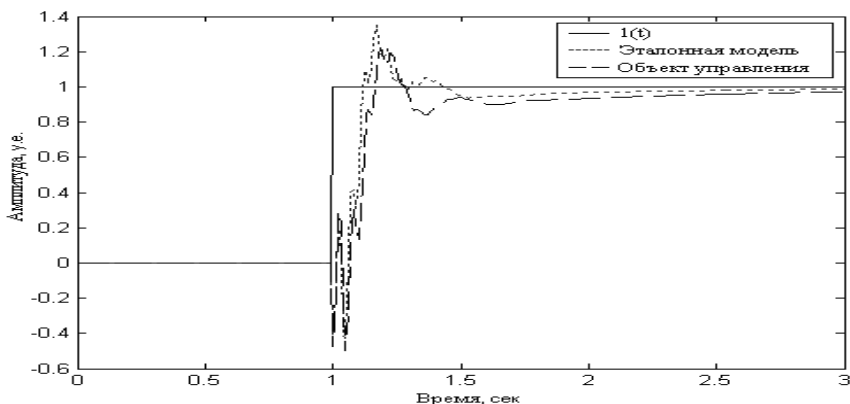


Рис. 4. Переходная характеристика замкнутой нейросетевой системы управления НМФ объектом

Выводы. В работе обоснована возможность применения замкнутой нейросетевой схемы управления с эталонной моделью для управления неминимально-фазовым объектом с запаздыванием. Такая схема изменяет взаимосвязь между входами и выходами объекта с НМФ характеристикой в соответствии с динамикой эталонной модели, которая является минимально-фазовой, в режиме on-line обучения нейроконтроллера в каждый момент времени. Предложенная архитектура управления очень проста, однако, как показало компьютерное моделирование, она позволяет значительно улучшить показатели качества процесса управления даже в случае НМФ объекта с запаздыванием. Качество управления зависит от выбранной архитектуры и параметров нейроконтроллера, а также значений коэффициентов ПИД-регулятора и, таким образом, разработка методики выбора оптимальных значений параметров является целью дальнейшей работы.

Список литературы: 1. Astrom K., Hagander P., Sternby J. Zeros of sampled systems.– Automatica, 1984, Vol. 20, pp. 31-38. 2. Walgama K. and Sternby J. A feedforward controller design for periodic signals in non-minimum phase processes.– International Journal of Control, 1995, Vol. 61, No. 3, pp. 695-718. 3. Ротач В.Я., Ключев А.С. и др. Автоматизация настройки систем управления / Под ред. Ротача В.Я.– М.: Энергоатомиздат.– 1984, 272 с.

Поступила в редколлегию 30.01.09

В.А. КОЛБАСИН, ассистент НТУ «ХПИ»,
Н.С. ШИРЯЕВА, студентка НТУ «ХПИ»

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ ВИДЕОКАРТ ПРИ СОЗДАНИИ КЛИЕНТ-СЕРВЕРНОЙ СИСТЕМЫ ОБРАБОТКИ РАСТРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

У статті запропоновано архітектуру сервера обробки растрових зображень, здатного використовувати обчислювальні ресурси головних процесорів системи та відеокарт. Запропоновано підхід до забезпечення прямої та зворотної сумісності модулю обробки зображень та сервера. Розглянуто застосування данної архітектури для створення веб-застосування створення та обробки зображень з розширеним динамічним діапазоном.

В статье предложена архитектура сервера обработки растровых изображений, способного использовать вычислительные ресурсы основных процессоров системы и видеокарт. Предложен подход к обеспечению прямой и обратной совместимости модуля обработки изображений и сервера. Рассмотрено применение данной архитектуры для создания веб-приложения создания и обработки изображений с расширенным динамическим диапазоном.

The architecture of image processing server that can use central processor and video card processors is proposed. The approach to provide forward and backward compatibility between image processing module and other server modules is proposed. Proposed architecture using for development high dynamic range image processing web-application is considered.

Введение. Методы и средства цифровой обработки изображений (ЦОИ) широко используется в медицине, фотографии, предпечатной подготовке и других областях человеческой деятельности. Однако при практическом использовании ресурсоемких операций ЦОИ, примером которых может служить обработка фотографий формата RAW, повышение локальной контрастности медицинских изображений, восстановления изображения с расширенным динамическим диапазоном (HDR), возникает ряд проблем. Чтобы такие операции выполнялись быстро, необходимо увеличить вычислительную мощность компьютера, установленного на рабочем месте оператора, что в случае непостоянного использования данных операций невыгодно. Но с другой стороны, длительное ожидание результата при использовании маломощного компьютера вызывает дискомфорт оператора и приводит к желанию избежать использования ресурсоемких операций, что в конечном итоге снижает эффективность работы.

В том случае, если потребность в выполнении ресурсоемких операций ЦОИ возникает на нескольких рабочих местах, проблему можно решить установкой в локальной сети предприятия достаточно мощного сервера, который будет выполнять операции обработки изображений. При этом в силу определенных особенностей организации алгоритмов ЦОИ достаточную вычислительную мощность сервера можно обеспечить за счет использования

более дешевых вычислительных средств SIMD-архитектуры [1], таких как платы Tesla и видеокарты, поддерживающие использование их процессоров для неграфических вычислений при помощи технологий CUDA и CTM [2].

Наиболее перспективным представляется организация доступа к серверу приложений при помощи web-интерфейса, так как в этом случае не требуется развертывать на рабочих станциях клиентское программное обеспечение.

Таким образом, данная работа посвящена созданию архитектуры клиент-серверной системы для ресурсоемкой обработки растровых изображений, способной использовать платы ускорения вычислений и видеокарты.

Архитектура системы обработки изображений. Рассматриваемая в данной работе система состоит из двух частей – собственно сервера обработки изображений и web-приложения для доступа к нему. Сервер обеспечивает хранение в памяти и обработку достаточно большого количества изображений с использованием различных вычислительных устройств: основных процессоров сервера и видеокарт. Web-приложение обеспечивает взаимодействие клиента с сервером.

Чтобы выполняться наиболее эффективно, функции ЦОИ должны быть написаны с учетом архитектуры вычислительных ресурсов сервера. Однако в процессе эксплуатации сервера тип и количество его центральных процессоров и плат расширения (видеокарт) может меняться. В этом случае реализация функций ЦОИ должна быть модифицирована, причем, поскольку эти изменения не меняют базовую функциональность сервера, модификации должны осуществляться прозрачно для остальных его частей. Наиболее просто и эффективно этого можно достичь, вынеся реализацию функций ЦОИ в динамически компокуемую библиотеку (далее библиотека). Тогда при изменении конфигурации аппаратного обеспечения сервера для изменения реализации функций ЦОИ достаточно будет заменить лишь файл библиотеки.

Впрочем, в этом случае возникает проблема обеспечения совместимости версий сервера и библиотеки. Причем из-за сложности создания реализации функций ЦОИ может сложиться ситуация, когда более новая версия сервера должна будет работать со старой версией библиотеки и наоборот. То есть, необходимо обеспечить как прямую, так и обратную совместимость. Этого можно достичь, если библиотека будет сообщать серверу о наборе реализуемых ею функций и об их параметрах. При этом каждой функции и каждому параметру функции должны быть присвоены числовые идентификаторы, уникальные на протяжении всего жизненного цикла системы. На основании этих идентификаторов клиенты смогут определять, поддерживает ли сервер нужные им функции с необходимым набором параметров. Также на основании этих данных клиентское приложение сможет внести соответствующие изменения в интерфейс пользователя.

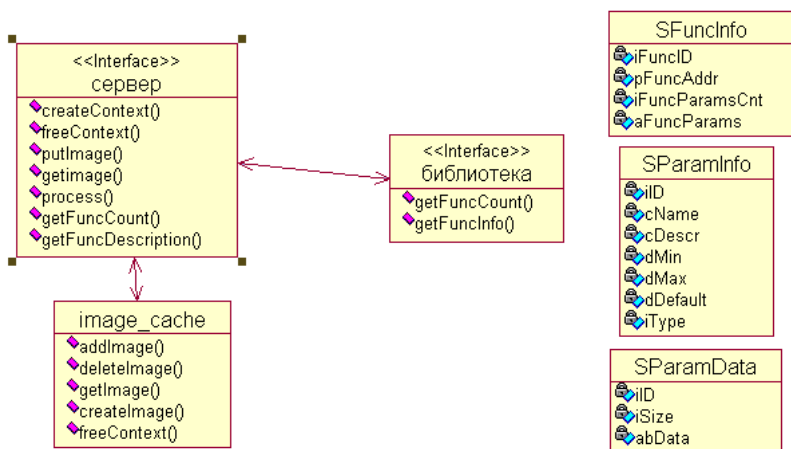
В большинстве практических приложений процесс обработки изображения представляет собой последовательное выполнение набора операций над одним или несколькими изображениями. Чтобы при выполнении каждой

следующей операции не передавать по сети изображение на сервер, последний должен обеспечить хранение исходных и результирующих изображений. Особенно это необходимо при использовании сервера web-приложением, поскольку оно обычно отображает изображения большого размера по частям. Для этой цели на сервере должен быть реализован контейнер с функцией автоматического удаления устаревших изображений (кэш изображений).

Поскольку при использовании видеокарт данные изображений располагаются в памяти видеокарты, о существовании которой известно только библиотеке, то контейнер на первый взгляд должен быть реализован именно в библиотеке функций ЦОИ. Однако такое решение может привести к увеличению вероятности сбоев из-за дублирования функционала контейнера в большом количестве библиотек для разной архитектуры. Поэтому кэш изображений должен быть реализован на сервере, а в библиотеках, использующих локальную память видеокарт, может быть реализован второй уровень кэширования, прозрачный для сервера.

В зависимости от архитектуры аппаратуры сервера, предполагаемой ресурсоемкости запроса и интенсивности потока запросов сервер может выполнять запросы последовательно или параллельно. Поскольку все данные об архитектуре сервера содержатся в библиотеке, то и распределение запросов по вычислительным узлам сервера и их сериализацию, если таковая необходима, должна выполнять библиотека.

С учетом всего вышеизложенных требований, программное обеспечение сервера приобретает архитектуру, представленную на рисунке.



Архитектура сервера обработки изображений

Как и во всех клиент-серверных системах, поддерживающих сеансы [3], клиент перед началом использования функций сервера должен создать

логическое соединение – контекст, путем вызова функции **createContext**. Функция возвращает идентификатор контекста, который далее используется для разделения доступа к изображениям различных клиентов и для освобождения занятых ресурсов при неожиданном отключении клиента. По завершению работы с сервером клиент (или транспортный уровень сервера при таймауте соединения с клиентом) вызывает функцию **freeContext**, которая освобождает все связанные с соединением ресурсы.

Хранение изображений на сервере обеспечивает контейнер **image_cache**, реализующий модель доступа к элементам по ключу. Ключом является идентификатор изображения, назначаемый ему контейнером при размещении или создании изображения. Клиент может размещать изображения на сервере и считывать их с помощью функций **putImage** и **getImage** соответственно. Для выделения памяти под результирующее изображение используется функция **createImage**. При размещении изображения на сервере ему автоматически присваивается контекст соединения, в рамках которого оно было создано.

Сервер предоставляет клиенту информацию о реализуемых библиотекой функциях ЦОИ посредством функций **getFuncCount** и **getFuncInfo**, которые вызывают одноименные функции библиотеки ЦОИ. Первая функция возвращает количество реализуемых библиотекой функций ЦОИ, а вторая – информацию о функции с заданным порядковым номером в виде структуры **SFuncInfo**, в которой содержится идентификатор функции, адрес вызова (только при обмене между сервером и библиотекой) и список параметров функции.

Параметры функции описываются структурой **SParamInfo**, содержащей идентификатор параметра **iID**, его название **cName** и описание **cDescr**, граничные значения **dMin** и **dMax**, значение по умолчанию **dDefault** и тип параметра **iType**. Значения полей идентификатора и типа параметра используются при формировании списка параметров для вызова функции ЦОИ, остальные поля используются только для поддержки интерфейса пользователя. На данный момент параметр может быть либо числом, либо изображением. Значение числовых параметров задается числом с плавающей точкой двойной точности. Для изображений в качестве значения параметра выступает числовой идентификатор изображения в контейнере.

В процессе осуществления вызова функции ЦОИ клиент передает серверу идентификатор вызываемой функции и список ее параметров в виде массива структур **SParamData**. Сервер проверяет допустимость параметров функции, получает из библиотеки адрес вызова функции по ее идентификатору и выполняет вызов.

Все функции ЦОИ имеют следующий прототип:

int process(image_cache *c, int iParamCnt, SParamData *pParams).

Возвращаемое значение отражает результат выполнения функции. Ненулевое возвращаемое значение свидетельствует о том, что при

выполнении функции произошла ошибка и является кодом этой ошибки. Нулевое – о том, что функция выполнена успешно.

Применение. Предложенная выше архитектура была применена при создании web-приложения для создания и обработки изображений с расширенным динамическим диапазоном (HDRI). Соответствующие алгоритмы достаточно ресурсоемки и неплохо реализуются на вычислительных устройствах SIMD-архитектуры. Процесс работы с HDRI включает в себя их создание из нескольких фотоизображений, сделанных с различным значением экспозиции, обработку и тональную компрессию – процесс преобразования HDRI изображения в изображение с обычным динамическим диапазоном.

Для создания web-приложения был использован язык PHP. Сервер был реализован в виде динамически компонуемой библиотеки расширения PHP машины [4]. Сервер инициализируется при запуске PHP-машины и предоставляет PHP-программе набор функций для работы с контекстом соединения и чтения/записи изображений. Функция вызова операции ЦОИ сервером не экспортируется, а вместо этого экспортируются конкретные функции создания HDR изображения и его тональной компрессии. Также сервер предоставляет приложению возможность получить информацию о параметрах данных функций.

Алгоритмы создания HDR изображения [5] и тональной компрессии [6] были реализованы в двух версиях библиотек функций ЦОИ, использующих вычислительные ресурсы основных процессоров и процессора видеокарты. По трем фотографиям размером 3000*2000 точек было сформировано HDR изображение и выполнена его тональная компрессия с использованием обеих библиотек. При использовании ресурсов процессора время обработки составило 115 секунд, а при использовании ресурсов видеокарты – 7 секунд, то есть скорость обработки изображений при переходе на использование видеокарт увеличилась в 16,5 раз. При таком ускорении обработки затраты времени на передачу изображения по сети будут скомпенсированы. А данная архитектура может найти свое применение при построении систем ресурсоемкой обработки изображений.

Список литературы: 1. Немнюгин С., Стесик О. Параллельное программирование для многопроцессорных вычислительных систем. – СПб.: БХВ-Петербург. – 400 с. – 2002. 2. Mark W. Future graphics architecture // ACM Queue. – 2008. – Vol. 6, № 2. – p. 54-64. 3. Танненбаум Э., ванн Стеен М. Распределенные системы: принципы и парадигмы. – СПб.: Питер, 2003. – 880 с.. 4. Шлюсстейгл Дж. Профессиональное программирование на PHP. – М.: Вильямс, 2006. – 624 с. 5. Debevec P., Jitendra M. Recovering High Dynamic Range Radiance Maps From Photographs // Proceedings of SIGGRAPH 1997. – pp. 130-135. 6. Biswas K.K., Pattanaik S. A Simple Spatial Tone Mapping Operator for High Dynamic Range Images // Proceedings of 13th Color Imaging Conference, 2005. – P. 291-296.

Поступила в редакцию 26.02.09

В. А. ШЕХОВЦОВ, канд. техн. наук, доцент НТУ «ХПІ»

РЕЖИМИ ВИКОРИСТАННЯ ІНТЕРАКТИВНОГО СЕРЕДОВИЩА ПІДТРИМКИ ІНТЕРАКТИВНОГО ЗБОРУ ВИМОГ ЯКОСТІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Збір вимог до нових програмних проєктів традиційно спирається на інтерв'ю з зацікавленими особами. Проведення такого збору є складною задачею, оскільки очікувані користувачі досить часто не можуть пояснити, які системні якості їм треба отримати. Ми пропонуємо обійти цю проблему шляхом конструювання та використання спеціальної програмної системи – інтерактивного імітаційного середовища (ІІС). Користуючись ІІС, потенційні користувачі можуть наглядно досліджувати можливі засоби організації комп'ютерної підтримки їх праці. У роботі розглянуто основні режими використання ІІС.

Сбор требований к новым программным проектам традиционно опирается на интервью с заинтересованными лицами. Проведение такого сбора является сложной задачей, поскольку ожидаемые пользователи довольно часто не могут объяснить, какие системные качества им нужно получить. Мы предлагаем обойти эту проблему путем конструирования и использования специальной программной системы – интерактивной имитационной среды (ИИС). Пользуясь ИИС, потенциальные пользователи могут наглядно исследовать возможные средства организации компьютерной поддержки их работы. В работе рассмотрены основные режимы использования ИИС.

Requirements elicitation for new computer applications rests traditionally on interviewing stakeholders. That makes getting the user requirements right more complicated than is necessary because the anticipated users not necessarily are good at talking about the kind of computer aid and its qualities they would appreciate. We suggest bypassing that problem by constructing and using POSE a parameterized online simulation environment within which anticipated users can explore ways of computer support for their work and which then makes it easier to talk about a potential computerized aid and the qualities thereof. The paper describes main POSE working modes.

1. Вступ. У цій роботі ми розглядаємо підхід до збору вимог якості до програмних систем. Такий збір у випадку нових програмних проєктів традиційно спирається на інтерв'ю з зацікавленими особами (ЗО). Його проведення є складним завданням, оскільки ЗО досить часто не можуть пояснити, які системні якості їм треба отримати. Ми пропонуємо розробити й використувати для збору вимог якості спеціальне програмне середовище – *ІІС (інтерактивне імітаційне середовище)*, у якому ЗО можуть взаємодіяти з імітаційною моделлю системи, що розроблюється (СщР) в рамках процесів її використання, теж заданих імітаційними моделями. У ході цієї роботи вони можуть оцінювати якісні характеристики, задані моделлю, визначаючи тим самим (або уточнюючи для себе) якісні вимоги до вихідної системи. Це дає ЗО можливість більш вільно оцінювати якість системи та потенційну підтримку, яку вони очікують отримати. Ми очікуємо, що використання ІІС спростить формулювання вимог якості, природно, що для підтвердження цього будуть потрібні додаткові емпіричні дослідження. Ця робота присвячена

розв'язанню завдання визначення основних режимів роботи імітаційного середовища.

План роботи. У розділі 2 ми оцінимо сучасні методи збору вимог якості. У розділі 3 буде наведена постановка завдання визначення основних режимів розробки ПС, розділ 4 буде присвячено опису цих режимів, у розділі 5 будуть розглянуті типи користувачів системи. Наприкінці роботи будуть наведені висновки та план подальших досліджень.

2. Існуючі технології збору вимог якості. У цьому розділі ми розглянемо існуючі технології збору вимог якості.

Технології, у яких задіяні зацікавлені особи. Ці технології використовують традиційні підходи (інтерв'ю, методи "мозкового штурму", списки для перевірки й т.ін.). Звичайно для цього набір вимог якості структурують, після чого це подання використовується як підказка для зацікавлених осіб. Технології, орієнтовані на мети [1] класифікують вимоги якості відповідно до мет системи. Словникові технології [2, 3] використовують для цього спеціальні словники. Підхід Quality Attribute Workshops [4] визначає організаційне середовище, ціль якого – ідентифікація атрибутів якості даної системи (характеристик, які задовольняють вимогам якості) шляхом розробки їхніх інтерпретацій для кожного конкретного випадку (сценаріїв), ідентифікації сценаріїв, визначення їхніх характеристик і завдання пріоритетів.

Технології видобутку вимог. Вихідними даними для цих технологій є специфікації вимог, задані у вигляді тексту природною мовою або в структурованому виді. Для автоматизованого одержання вимог із цих документів передбачається використовувати засоби обробки природної мови, засобу видобутку інформації (Information Retrieval) і інші подібні технології. У методі Theme/Doc [5] виробляється обробка специфікацій вимог шляхом пошуку ключових слів, які використовуються для генерації діаграм для етапу проектування. У роботі [6] використовуються технології видобутку інформації (зокрема, робота з регулярними вираженнями) для пошуку вимог, які ставляться до конкретної якості системи. Дотримуючись підходу [7], визначається набір слів-індикаторів (ключових слів), цей набір навчається на реченнях-прикладках (визначаючи ваги, що задають відповідність термінів категоріям вимог), після чого пропозиції документа класифікуються по категоріях вимог на підставі інтегральної ваги всіх їхніх індикаторів.

Підходи для конкретної предметної області. Існують підходи, які орієнтовані на збір певних класів вимог якості. Так, наприклад, проект TROPOS [8] підтримує деякі технології й програмні засоби, призначені для збору вимог безпеки, такі як діаграми безпеки, обмеження безпеки й т.д. Варіанти невірнього використання (misuse cases [9]) допомагають у зборі вимог безпеки, описуючи сценарії некоректного або несанкціонованого використання системи. Інші підходи орієнтовані на збір вимог до продуктивності [10], до надійності й т.ін.

3. Постановка завдання визначення основних режимів роботи ІС. У цьому розділі ми зупинимось на недоліках наведених підходів, покажемо, яким чином дослідження цих недоліків може привести до ідеї ІС та сформулюємо постановку завдання визначення основних режимів його використання.

Наведені технології збору вимог якості не вільні від недоліків. Так, основний недолік підходів, у яких задіяні ЗО, полягає в тім, що багато ЗО не можуть обговорювати вимоги якості без попереднього досвіду практичної роботи із системою. Недоліком технологій видобутку вимог є обмежена участь зацікавлених осіб у процесі одержання вимог. На практиці, після того, як процес збору завершений, вимоги все одно повинні пройти додаткову верифікацію зацікавленими особами. Використання підходів для конкретної предметної області, як правило, обмежене цією областю,

Для розв'язання цих проблем необхідно розробити інтерактивне імітаційне середовище, яке б дозволяло ЗО придбати досвід взаємодії із СщР якомога раніше. Для розробки такого середовища потрібно перш за все визначитися з режимами його роботи. Ці режими повинні забезпечувати досягнення основних цілей розробки ІС, архітектура ІС повинна бути спроектована з урахуванням необхідності їхньої підтримки.

4. Режими використання ІС. Ми стверджуємо, що ІС може використовуватися в чотирьох режимах:

1. *режимі конструювання моделі*, коли відбувається адаптація середовища імітаційного моделювання для конкретного завдання;
2. *режимі виконання моделі*, призначеному для інтерактивного збору оцінок якості СщР у ході взаємодії ЗО з імітаційними моделями, для яких визначені різні значення ключових параметрів;
3. *режимі аналізу вимог*, що використовується для аналізу результатів експериментів (оцінок якості) і формулювання вимог, зібраних у ході цих експериментів;
4. *режимі перевірки доцільності*, коли відбувається перевірка, чи є доцільним розгортання ІС для конкретної організації, яка оперує у визначених ресурсних обмеженнях.

Базова ідея. Ми розглядаємо організацію як систему, у якій виконується певний набір бізнес-процесів. Як наслідок, для створення імітаційної моделі організації нам необхідно змодельовати її структуру, ресурси (у тому числі людські), які вона використовує, її бізнес-процеси.

Для моделювання процесів ми пропонуємо використовувати програмний засіб, розроблений у результаті досліджень в області асоціативного пошуку й повторного використання бізнес-процесів: асемблер процесів (АП) [11]. АП зберігає моделі процесів, описані на різних мовах моделювання процесів (ММП), і дає можливість відображати моделі з одної ММП на іншу за умови,

що виразні засоби мови дозволяють виконувати таке відображення, і в системі зареєстровані відповідного драйвера для відображення.

Зовнішні системи можуть одержувати доступ до АП через інтерфейс веб-сервиса. У цьому випадку як така зовнішня система виступає ІС. З погляду ІС, процес взаємодії з АП виглядає в такий спосіб. ІС генерує запит на одержання моделі процесу, у якому вказується використовувана у ньому ММП, а також інші параметри відповідно до метаданих АП. АП одержує найбільш підходящі моделі з використанням засобів асоціативного пошуку й, якщо отримана модель описана на ММП, з якою ІС не може працювати, відображає цю модель на потрібну мову, якщо для неї в АП є драйвер.

Якщо згадані моделі доступні, доступна інформація щодо навантаження, тобто інформація з розподілу ймовірностей активізації процесів, необхідне час обробки для цих процесів, інформація з утилізації ресурсів і т.д., у принципі можна побудувати імітаційну модель всієї організації. Основна мета розробки ІС - дати можливість потенційним користувачам СщР одержати досвід взаємодії з імітаційною моделлю, що опирається на ключові параметри використання СщР. Ми маємо намір забезпечити взаємодію серверних компонентів імітаційної моделі й моделей програмних компонентів, через які користувачі задають свої запити. Таким чином, ми можемо надати користувачам можливість одержати враження від випробування функціональності СщР, наближені до реального досвіду, з опорою на статистичний аналіз, закладений в імітаційній моделі.

Режим конструювання моделі. Однієї з найбільш важливих завдань, що повинні вирішити користувачі ІС, є початкове визначення області передбачуваного моделювання, тобто визначення того, що вважати моделіруемой організацією. Це завдання вимагає розуміння бізнес- процесів, для участі в які передбачається використовувати СщР. У режимі конструювання моделі, отже, необхідно визначити й формалізувати бізнес-процеси даної організації. У даній роботі ми не будемо обговорювати, як це може бути зроблено, підходи до розв'язання цього завдання є об'єктом подальшого дослідження.

Користувачі ІС надають всі початкові дані, які необхідні для проведення імітаційних експериментів. Зокрема, у цьому режимі необхідно задати структуру організації, включаючи ролі персоналу, а також інформацію про навантаження. Даний процес називається параметризацією ІС, він охоплює типові дані про навантаження, такі як частотні характеристики, розподіли появи подій, доступність персоналу й інших ресурсів, імовірність виникнення різних катастроф, ступінь серйозності цих катастроф і т.д.

Режим виконання моделі. У режимі виконання моделі виробляється імітаційне моделювання процесів, певних у режимі адаптації. На вибір користувачів, моделі компонентів СщР, зареєстрованих в ІС, можуть супроводжуватися графічною анімацією або виконуватися як реальні компоненти. Можливе перевизначення значень параметрів, заданих при параметризації ІС. Крім того, користувачі ІС можуть залишати коментарі із приводу їхніх

вражень від характеристик якості системи. Для цього пропонується дати їм можливість формально оцінювати зареєстровані компоненти СщР. По-перше, вони можуть дати оцінку версії компонента СщР по десятибальній шкалі. Ця оцінка повинна відповідати впевненості користувачів у вигоді використання даної версії. По-друге, користувачі можуть із кожною парою версій СщР (V1,V2) зіставити предикати "*набагато краще*(V1,V2)", "*краще*(V1,V2)", "*небагато краще*(V1,V2)", і "*еквівалентні*(V1,V2)".

Режим аналізу вимог. У цьому режимі користувачі працюють з даними, що отримані в режимі виконання моделі. Для таких користувачів (як правило, це – інженери зі збору вимог), ІС надає ряд звітів із заздалегідь проаналізованими експериментальними даними. Кожний такий звіт включає номер версії моделі, характеристики навантаження, структуру організації й т.ін. У цьому режимі також виконується перетворення оцінок ЗО у вимоги якості, для чого повинно бути сформульоване завдання багатокритеріального вибору.

Режим перевірки доцільності. Цей режим дозволяє аналітику досліджувати економічну доцільність розгортання запропонованого середовища та виконувати необхідні дії, якщо така доцільність не визначена, або якщо розгортання ІС є занадто важким. До цих дій відносяться коригування ресурсних обмежень або спрощення конфігурації ІС згідно з методологією системної оптимізації [12], а також розглядання можливості вибору альтернативної технології збору вимог якості, якщо таке коригування неможливе. При оцінюванні альтернативних технологій збору вимог якості будуть використовуватись критерії, що базуються на певній моделі якості, ці критерії будуть інтегровані у задачу багатокритеріального прийняття рішень.

5. Типи користувачів ІС. Експерти ІС роблять адаптацію ІС. Вони підрозділяються на експертів по бізнес- процесам (БЕ) і експертів по системі, що розроблюється (СЕ). БЕ задають процеси використання системи, вони є фахівцями в області бізнес-процесів фірми й можуть перетворювати свої знання в дії, вироблені в режимі з. Такі експерти звичайно не знайомі з усіма тонкощами розробки СщР і в більшості випадків розглядають її як "чорну шухляду". СЕ проектують і створюють моделі СщР і прототипи компонентів СщР, після чого інтегрують їх в ІС. Ми припускаємо, що в ролі СЕ будуть виступати кваліфіковані розроблювачі.

ЗО – це користувач, що може оцінювати якісні характеристики СщР у процесі інтерактивної взаємодії з імітаційною моделлю. Деякі ЗО добре знайомі з основним бізнесом фірми й розуміють, як до цього бізнесу ставиться СщР. Ми очікуємо, що такі СщР мають знання об бізнес- процесах передбачуваного використання СщР і зовнішніх вимогах до якості СщР, таких, як продуктивність або доступність. Інші ЗО є фахівцями в області інформаційних технологій, які відповідають за організацію інформаційної інфраструктури фірми, тобто за виконання установки, відновлення або підтримки системи. Вони, швидше за все, нададуть вимоги, які ставляться до

якісних характеристик процесу розробки, що зачіпає СщР. Прикладами таких вимог є вимоги до захисту, супроводжуваності, здатності до розвитку.

Системний адміністратор (СА) робить регулярні дії по підтримці працездатності ІС. Він відповідає за адміністративні завдання, такі як резервне копіювання або щоденну підтримку. Такі адміністратори також відповідають за успішне виконання імітаційного моделювання й виконують ролі адміністраторів такого моделювання (виконують прогнози моделей, інструктують і навчають ЗЛ, дозволяють конфлікти, роблять із і т.д.). Крім того, СА повинен могли задавати параметри імітаційної моделі.

6. Висновки й перспективи подальшої роботи. У ході виконання дослідження були запропоновані режими використання інтерактивного середовища збору вимог якості, які дозволяють йому надавати ЗО можливість ознайомитись з модельованими якостями СщР до того, як вони братимуть участь безпосередньо у зборі вимог.

Ми збираємося реалізувати перший прототип ІС. Після цього нашою метою є перевірка коректності цього прототипу. У ході цієї перевірки ми сподіваємося показати, що ІС (принаймні, для певних випадків) є ефективнішим засобом збору вимог якості в порівнянні з іншими методами.

Список літератури: 1. Non-functional requirements in software engineering / L. Chung, B. A. Nixon, E. Yu, J. Mylopoulos. – Boston : Kluwer, 1999. – 476 p. – ISBN 978-0-7923-8666-7. 2. Cysneiros L. M. Non-Functional Requirements Elicitation / L. M. Cysneiros, E. Yu // J. C. Sampaio do Prado Leite, J. H. Doorn (Eds.). Perspectives on Software Requirements. – Boston : Kluwer, 2004. – P. 115-138. – ISBN 978-1-4020-7625-1. 3. Шеховцов В. А. Обработка требований качества на ранних этапах разработки программного обеспечения / В. А. Шеховцов // Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Тематический выпуск «Системный анализ, управление и информационные технологии». – Харьков : НТУ «ХПИ». – 2007. – № 41. – С. 162-170. 4. Quality Attribute Workshops (QAWs), Third Edition. Technical Report CMU/SEI-2003-TR-016 / M. R. Barbacci, R. Ellison, A. J. Lattanze [et al.]. – Pittsburgh, PA : Carnegie Mellon University, Software Engineering Institute. – 2003. – 38 p. 5. Clarke, S. Aspect-oriented analysis and design: the Theme approach / S. Clarke, E. Baniassad. – Reading, MA : Addison-Wesley, 2005. – 400 p. – ISBN 0-321-24674-8. 6. Rosenhainer, L. Identifying crosscutting concerns in requirements specifications [Electronic resource] / L. Rosenhainer // Workshop on early aspects. – 2004. – Vancouver, Canada. – <http://trese.cs.utwente.nl/workshops/oopsla-early-aspects-2004/Papers/Rosenhainer.pdf> 7. Cleland-Huang, J. Automated classification of non-functional requirements / J. Cleland-Huang, R. Settimi, X. Zou, P. Solc // Requirements Engineering. – 2007. – Vol. 12, Issue 2. – P.103-120. 8. Bresciani, P. TROPOS: An Agent-Oriented Software Development Methodology / P. Bresciani, P. Giorgini, F. Giunchiglia [et al.] // Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems. – 2004. – Vol.8, Issue 3. – P. 203–236. 9. Alexander, I. Misuse Cases: Use Cases with Hostile Intent / I. Alexander // IEEE Software. – 2003. – Vol. 20, Issue 1. – P. 58-66. 10. Nixon, B. A. Managing Performance Requirements for Information Systems / B. A. Nixon // Proceedings of the 1st international workshop on Software and performance. – New York : ACM Press. – 1998. – P. 131-144. – ISBN 1-58113-060-0. 11. Zlatkin, S. Towards Amplifying Business Process Reuse / S. Zlatkin, R. Kaschek // J. Akoka, S. W. Liddle, I.-Y. Song [et al.] (Eds.). Perspectives in Conceptual Modeling: ER 2005 Workshops, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 3770. – Berlin-Heidelberg : Springer, 2005. – P.364-374. – ISBN 3-540-29395-7. 12. В. М. Глушков. О системной оптимизации. / В. М. Глушков // Кибернетика. – 1980. – № 5. – С. 89-90.

Поступила в редколлегию 23.03.09

С. С. ЛУГОВОЙ, студент НТУ «ХПИ»,
Ю. С. ШАХНОВСКИЙ, канд. техн. наук, доцент НТУ «ХПИ»

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ДОПУСТИМОСТИ ПЕРЕСТАНОВКИ ПРАВИЛ МЕЖДУ ЦЕПОЧКАМИ В СИСТЕМЕ ФИЛЬТРАЦИИ ПАКЕТОВ

У статті розглядається оптимізація систем фільтрації Internet-шлюзів. Запропоновані додаткові резерви оптимізації за рахунок перестановки правил між ланцюжками. Сформульовано умови припустимості перестановки правил та правило розрахунку критерію якості для нової перестановки.

В статье рассматривается оптимизация систем фильтрации Internet-шлюзов. Предложены дополнительные резервы оптимизации за счет перестановки правил между цепочками. Сформулированы условия допустимости перестановки правил и правило расчета критерия качества для новой перестановки.

In article optimization of systems of a filtration of Internet-gateways is considered. Additional reserves of optimization are offered due to rearrangement of rules between chains. Conditions of an admissibility of rearrangement of rules and a rule of calculation of criterion of quality for new rearrangement are formulated.

Введение. В сетевых шлюзах для управления прохождением пакетов через шлюз используются системы фильтрации. Такие системы состоят из нескольких упорядоченных последовательностей (цепочек) правил фильтрации. Существует три типа правил. Пакет, попавший в систему, поступает на проверку главной цепочкой правил фильтрации. Проверка правилами осуществляется в порядке их следования в цепочке. При нахождении соответствия данного пакета некоторому правилу типа **а** пакет покидает систему фильтрации (будет переслан далее по маршруту либо уничтожен). При соответствии данного пакета правилу типа **б** дальнейшая судьба данного пакета будет определяться правилами цепочки, на которую передается управление. Правило типа **в** определяет передачу пакета на проверку в предыдущую (вызывающую) цепочку. Цепочки соединены между собой правилами типа **б** и **в**. Если построить оргграф, вершинами которого будут цепочки, а дугами – передачи управления правилами типа **б**, он будет ациклическим.

Чем меньшее количество правил проверяется для принятия решения о судьбе пакета, тем меньше затраты вычислительного времени ЭВМ. Допустимо переупорядочивание правил с сохранением результата работы системы. В [1] сформулированы условия, когда переупорядочивание правил внутри одной цепочки разрешено. За счет этого можно добиться уменьшения суммарного количества проверок всех пакетов системой фильтрации.

В [1, 2] рассмотрена задача оптимизации затрат времени при переупорядочивании правил в пределах каждой цепочки системы фильтрации

в отдельности, а также разработаны точные и эвристические алгоритмы решения поставленной задачи. Однако в этих работах не учитывалась возможность перестановки правил из одной цепочки в другую, что может дать дополнительные резервы для оптимизации.

Существующие системы фильтрации накапливают информацию о числе пакетов, соответствующих каждому правилу. Разумно предположить, что на следующем интервале времени относительные частоты пакетов изменяться не сильно. Время расчета по каждому правилу зависит от применяемых для расчета программ, однако в большинстве случаев это время можно считать единичным.

Постановка задачи. Известны: а) относительная частота встречи пакетов, соответствующих каждому из правил; б) список цепочек, составляющих систему фильтрации, а также списки правил, входящих в каждую из цепочек. Необходимо найти такую последовательность правил в цепочках, при которой среднее время прохождения пакета через систему фильтров минимально.

Критерии допустимости. Для решения поставленной задачи необходимо определить критерии допустимости перестановки правил из одной цепочки в другую. Введем обозначения, характеризующие каждое из правил, входящих в систему фильтрации.

Пронумеруем все цепочки правил и отдельные правила внутри цепочек арабскими цифрами, например, правило (i, j) – j -е правило i -й цепочки. При перестановке правил будем эти номера сохранять даже в случае изменения порядка следования правил. Т.е. номера правил полностью определяются их положением в начальной перестановке. Синтаксис каждого правила определяет множество пакетов, выделяемых данным правилом из универсума (всего теоретически возможного множества пакетов). Обозначим множество, задаваемое синтаксисом правила (i, j) как $P_{i,j}$. Но на вход правила поступает не универсум, а множество, ограниченное предшествующими правилами системы. Обозначим это множество как $U_{i,j}$. Множество пакетов, которые реально будут обработаны этим правилом, обозначим как $O_{i,j} = U_{i,j} \cap P_{i,j}$. Так же необходимо ввести множество пакетов, которые покинут систему после обработки (i, j) -м правилом $L_{i,j}$. Для правил типа **а** данное множество совпадает с $O_{i,j}$, для правил типа **в** оно является пустым множеством, а для правила типа **б** данное множество можно рассчитать по формуле:

$$L_{i,j} = O_{i,j} \cap \bigcup_{m \in M} L_{d,m},$$

где d – номер цепочки, на которую ссылается правило (i, j) ;

M – множество правил цепочки d .

Соотношение между введенными множествами показано на рис. 1.

Определим теперь условия допустимости перестановки правил из одной цепочки в другую. Будем рассматривать перестановку только самого первого правила дочерней цепочки и правила, непосредственно стоящего перед правилом перехода в дочернюю цепочку. Т.к. из [1] следует, что допускается перестановка правила из дочерней цепочки в родительскую только в том случае, если при перестановке в пределах дочерней цепочки оно может быть поставлено на первую позицию, а так же допускается перестановка правила из родительской цепочки в дочернюю только в том случае, если при перестановке в пределах родительской цепочки, оно может быть поставлено непосредственно перед правилом ветвления. Так же необходимо отметить, что допускается перестановка из одной цепочки в другую только правил типа *а* и *б*.

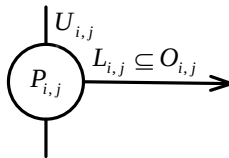


Рис. 1

Поскольку любая цепочка задает множество пакетов, покидающих систему, являющееся объединением множеств L , задаваемых входящими в нее правилами, то условия перестановки для правил типов *а* и *б* одинаковы.

Для наглядности на рисунках, поясняющих принципы перестановки правил, будем отображать состояние системы в начальный момент времени и в момент после перестановки правила.

Рассмотрим несколько основных структур связей между цепочками и условия допустимости перестановки правил из одной цепочки в другую для данного типа структуры. Несложно показать, что любые другие возможные структуры связей являются либо частным случаем основной структуры, либо комбинацией из нескольких основных структур.

Проанализируем эти структуры. Существует два варианта.

А) Одна цепочка является дочерней по отношению к нескольким другим (рис. 2, 3).

Как показано на рис. 2, правило дочерней цепочки d вставляем во все родительские при совместном выполнении условий:

$$U_{im,jm} \cap P_{d,1} \subseteq P_{im,jm}, m = 1..n.$$

После этого удаляем вставленное правило из родительских цепочек, для которых выполняется условие:

$$O_{im,jm} \cap P_{d,1} = \emptyset,$$

причем для проверки данного условия берем $O_{im,jm}$, рассчитанное до осуществления перестановки.

Обратная перестановка правила родительской цепочки в дочернюю показана на рис. 3.

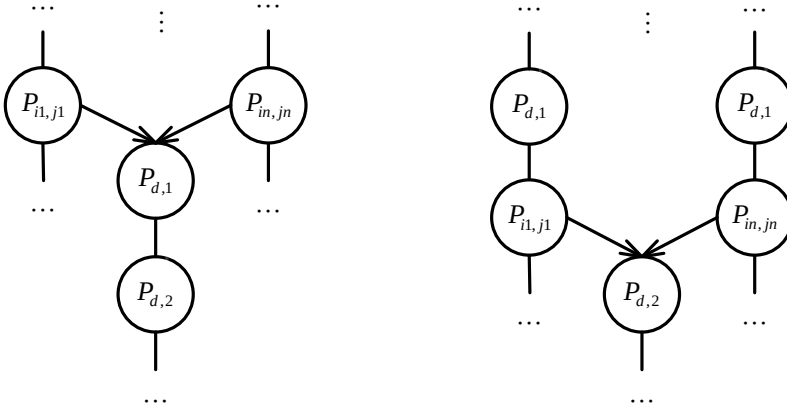


Рис. 2

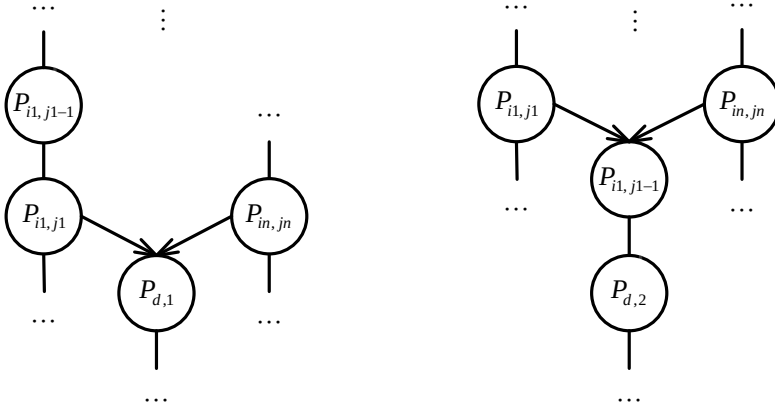


Рис. 3

В данном случае перестановка правила $(i1, j1-1)$ из родительской цепочки $i1$ в дочернюю цепочку d допустима при выполнении условий:

$$\begin{cases} O_{im,jm} \cap P_{i1,j1-1} = \emptyset, m = 2..n, \\ L_{i1,j1-1} \subseteq P_{i1,j1}. \end{cases}$$

Б) Несколько правил одной и той же родительской цепочки определяют переход в одну дочернюю цепочку (рис. 4, 5).

По рис. 4 проводим вставку правила $(d,1)$ перед всеми правилами родительской цепочки, определяющими переход в дочернюю цепочку d , для которых выполняется условие:

$$U_{i,jm} \cap P_{d,1} \subseteq P_{i,jm}, m=1..n.$$

Далее в цепочке i оставляем только то правило $(d,1)$, которое было вставлено перед правилом с минимальным номером jm .

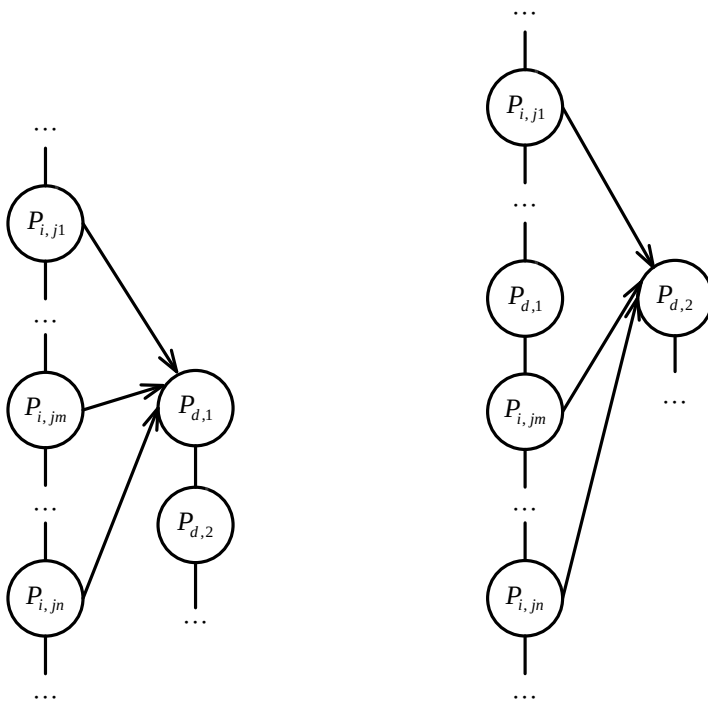


Рис. 4

При обратной перестановке правила из родительской цепочки в дочернюю, необходимо проверить условие допустимости перестановки:

$$\begin{cases} O_{i,jk} \cap P_{i,jm-1} = \emptyset, k=1..m-1, \\ L_{i,jm-1} \subseteq P_{i,jm}. \end{cases}$$

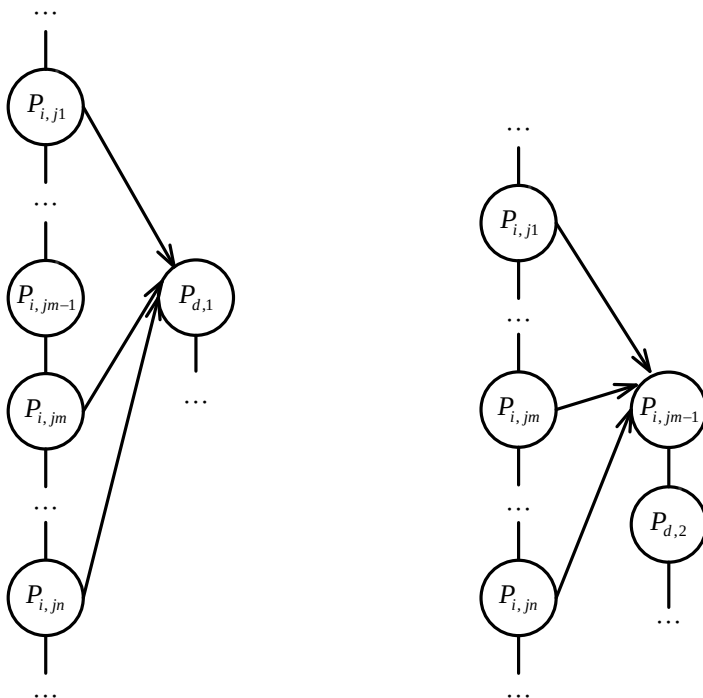


Рис. 5

Критерий качества. В процессе решения задачи оптимизации необходимо уметь сравнивать различные решения. Поскольку в задаче оптимизируются затраты времени, критерием качества после изменения порядка будет суммарное время проверки всех пакетов системой. Необходим алгоритм расчета этой величины. Если нам известно количество пакетов соответствующих множеству $U_{i,j}$ для любого правила (i, j) , то можно рассчитать критерий по формуле:

$$K = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} k_{i,j},$$

где K – искомый критерий качества;

n – количество цепочек в системе;

m_i – количество правил в цепочке i ;

$k_{i,j}$ – количество пакетов, соответствующее множеству $U_{i,j}$.

Попытаемся определить точное значение критерия качества некоторой простой системы цепочек, представленной рис. 6. Обозначим количество

пакетов, прошедших по некоторому направлению строчными латинскими буквами $a..g$, как показано на рисунке. Пусть правило $(2,1)$ является правилом типа a . Тогда количество пакетов, отвечающее правилу $(2,1)$, f состоит из двух слагаемых f_1 и f_2 – обработанных по ветвлению по $(1,1)$ и $(1,2)$ правилам соответственно:

$$f = f_1 + f_2.$$

Аналогично для пакетов, не соответствующих правилу $(2,1)$:

$$g = g_1 + g_2.$$

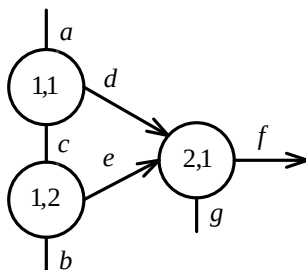


Рис. 6

Тогда критерий качества составит:

$$K = a + c + (d + e).$$

Причем a , d и e известны, а c – нет. Для нахождения неизвестного c запишем систему уравнений относительно $a..g$, которые следуют из приведенной системы правил:

$$\begin{cases} c = (a - d) + g_1, \\ b = (c - e) + g_2. \end{cases}$$

Параметры g_1 и g_2 неизвестны, но связаны равенством, добавим его в систему уравнений и получим:

$$\begin{cases} c = (a - d) + g_1, \\ b = (c - e) + g_2, \\ g = g_1 + g_2. \end{cases}$$

Несложными математическими преобразованиями можно показать, что данная система уравнений является линейно-зависимой, и нет возможности определить неизвестное s .

Это означает, что информации выдаваемой существующими системами фильтрации не достаточно для точного расчета сформулированного критерия качества перестановки правил. В рамках данной работы не предполагается вносить изменения в механизм сбора информации системой фильтрации. Вместо этого предлагается метод получения приблизительной оценки качества системы правил.

Причиной невозможности точного расчета критерия качества является отсутствие полной информации о соотношении количества пакетов из родительских цепочек, которые соответствуют множеству O правила из дочерней цепочки. Предлагается считать, что количество пакетов f_1 , покидающее систему по некоторому правилу дочерней цепочки, пропорционально отношению количества пакетов обработанных правилом родительской цепочки, по которому происходит переход в данную дочернюю цепочку (d), к общему количеству пакетов попавших в цепочку ($d + e$). Данное допущение вносит в оценку критерия качества погрешность. Для оценки этой погрешности был проведен эксперимент на 100 случайно сгенерированных системах цепочек. Средняя погрешность расчета по предложенному правилу составила 0.92 %.

Эксперименты, проведенные с оптимизацией внутри цепочки [2] дали выигрыш значительно больше этой величины. С другой стороны погрешность, вносимая изменением во времени частот пакетов, соответствующих правилам, даст погрешность большую, чем погрешность предложенного выше метода. Поэтому предлагаемый метод расчета критерия качества применим.

Выводы. Сформулированы критерии допустимости перестановки правил между цепочками. Предложен метод расчета критерия качества системы фильтрации, состоящей более чем из одной цепочки с использованием данных, собираемых существующими системами фильтрации. На основе этих исследований необходимо разработать алгоритмы оптимизации системы цепочек, которые должны дать больший выигрыш по сравнению с алгоритмами оптимизации внутри цепочки, предложенных в [1, 2].

Список литературы: 1. Шахновский Ю. С., Гончаров А. В. Оптимизация системы фильтрации пакетов. – Вестник НТУ «ХПИ». Сб. научных трудов. Тем. вып. «Системный анализ, управление и информационные технологии». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2003. – № 6. – С. 53-56. 2. Шахновский Ю. С. Оптимизация порядка последовательности условий – метод ветвей и границ. – Вестник НТУ «ХПИ». Сб. научных трудов. Тем. вып. «Системный анализ, управление и информационные технологии». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2003. – № 18. – С. 33-36.

Поступила в редколлегию 25.11.08

О. В. ТОНИЦА, канд. физ.-мат. наук, доцент НТУ «ХПИ»,
П. С. КАПЛУН, студент НТУ «ХПИ»

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

В статті розглядаються конструктивні методи і алгоритми моделювання мережі передачі даних, які дозволяють розв'язувати задачі оптимізації багатопунктових з'єднань, враховуючи обмеження на пропускну здібність каналів, а також підходи до їх програмної реалізації для побудови локальних обчислювальних мереж.

В статье рассматриваются конструктивные методы и алгоритмы моделирования сети передачи данных, которые позволяют решать задачи оптимизации многопунктовых объединений, учитывая ограничения на пропускную способность каналов, а также подходы к их программной реализации для построения локальных вычислительных сетей.

The constructive methods and algorithms for simulation of data networks are investigated. The data network described allow us to solve problems optimization of complex junctions with account limitations of capacity communications channels. The approaches for program realization of algorithms for simulation data network are proposed.

Введение. В наше время особую важность приобретает проблема разработки и широкого применения технических средств для усовершенствования творческой деятельности человека в сфере планирования, организационного управления и научных исследований. Это связано с тем, что в современных условиях многократно возросла сложность задач, решаемых в процессе планирования и управления в различных отраслях человеческой деятельности и при реализации крупномасштабных научных программ. Важной предпосылкой для успешного решения таких задач является их информационное обеспечение, основанное на использовании автоматизированных средств сбора и подготовки информации.

Проблема синтеза структуры сетей обмена данными является одной из важнейших и наиболее сложных задач проектирования. В структуре информационно–вычислительных сетей обычно выделяются две основные компоненты: средства сбора, хранения и обработки информации и средства передачи информации. В настоящее время существует много типов сетей, различающихся главным образом способом использования линий связи для передачи информации, а также расстоянием между отдельными пунктами сети. Современные сети передачи информации характеризуются широким кругом предоставляемых и планируемых услуг. В числе основных областей, базирующихся на использовании цифровых сетей, можно указать цифровую телефонию и телеконференции, автоматизированные системы обработки информации, системы передачи документов, электронную почту, массовые информационно справочные системы.

Локальная сеть представляет собой систему связи, обеспечивающую взаимодействие друг с другом различных средств сбора, хранения и обработки информации, расположенных на относительно небольшом расстоянии. Отличительная особенность локальной сети - это небольшая территория, на которой она функционирует. Для решения задачи выбора типа локальной сети необходимо определить топологию сети [1,2].

Для построения локальных сетей используются следующие типы:

1. Централизованная - все абоненты подключены к некоторому центральному пункту, через который и осуществляется их взаимосвязь. Такой тип топологии используется тогда, когда требования к надежности и живучести сети не имеют принципиального значения. Вид централизованной топологии представлен на рис. 1.

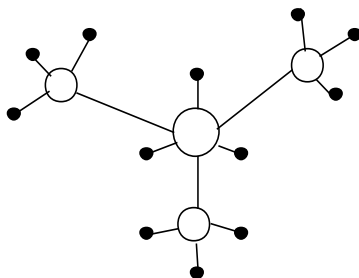


Рис. 1. Централизованная топология

2. Кольцевая - все узлы соединены кольцевой линией, и каждый узел является транслятором проходящих через него узлов. Достоинством такой топологии является простота реализации. Данная топология используется, когда надежность и непрерывность не имеют принципиального значения. Вид кольцевой топологии представлен на рис. 2.

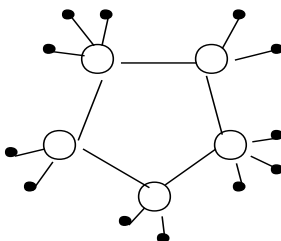


Рис. 2. Кольцевая топология

3. Распределённая - каждый узел сети связан с остальными несколькими различными маршрутами. Данная топология отличается надёжностью,

большой гибкостью и широкими возможностями. Вид распределённой топологии представлен на рис. 3.

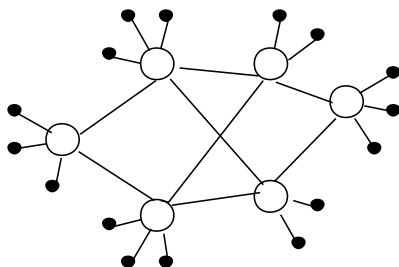


Рис. 3. Распределенная топология

Задача размещения узлов коммутации по первому методу решается по аналогии со сходной задачей группового статистического оценивания и имеет линейную трудоемкость в зависимости от числа абонентов.

Рассмотрим задачу привязки абонентов к узлам коммутации [3,4]. Пока топология межузловой связи не определена, принято считать, что абоненты подключаются к ближайшему узлу коммутации. Однако более детальное рассмотрение показывает, что иногда целесообразнее привязывать данного абонента не к ближайшему узлу, а к тому, с которым связано большее число абонентов, обменивающихся информацией с данными. При этом за счет некоторого увеличения длины и стоимости линии привязки может сократиться нагрузка и суммарная стоимость межузловых соединений, в результате чего стоимость сети уменьшится. Поэтому после построения топологии межузловой сети используется процедура уточнения.

При оптимизации многопунктовых соединений обычно предполагается, что имеется n терминалов, расположенных в заданных точках, и единственный центральный узел, положение которого также известно. Предполагается, что известны стоимости соединений, как между терминалами, так и между терминалом и центральным узлом. Задача состоит в том, чтобы построить дерево минимальной стоимости, которая равна сумме стоимостей его ребер, соединяющих все терминалы. Такая задача называется задачей о минимальном связывающем дереве, для построения которого существуют эффективные алгоритмы. Однако если учитывать ограничения на пропускную способность каналов связи и время задержки, то топология дерева часто оказывается неприемлемой. Пропускная способность ветви, соединяющей некоторую группу вершин с центром, может оказаться недостаточной для передачи суммарной нагрузки, создаваемой всеми терминалами, включенными в линию. Поэтому для сети такого вида вводится ограничение на число терминалов в каждой из многопунктовых линий или

нагрузку в каждой из этих линий. При таком ограничении значительно сложнее построить минимальное связывающее дерево. Получающаяся при этом топология представляет собой совокупность многопунктовых линий. Для построения минимального связывающего дерева и многопунктовых линий реализованы следующие методы и алгоритмы:

- алгоритм Прима;
- алгоритм Краскала;
- алгоритм построения ограниченного дерева;
- алгоритм Эссея-Вильямса;
- алгоритм Шарма;
- методы локальных преобразований.

Рассмотрим методы построения межузловой связи. Наиболее эффективными являются эвристические методы семейства оптимизационных процедур, называемые методами замены. Эти методы являются поисковыми процедурами, которые улучшают структуру сети, последовательно изменяя небольшие ее участки. В качестве исходной структуры обычно выбирается произвольная сеть, либо сеть с конфигурацией, получаемой в результате работы другой программы. Методы последовательной замены применяются до-тех пор, пока дальнейшие замены перестанут приводить к уменьшению стоимости. Реализованы следующие методы замены:

- метод Стейглица;
- метод замены ветвей;
- вогнутый метод исключения ветвей;
- вогнутый метод добавления ветвей.

Проблема синтеза структуры сетей обмена данными является одной из важнейших и наиболее сложных задач проектирования. Для решения этой проблемы рассмотрено решение двух взаимосвязанных задач:

- задачи определения числа и местоположения узлов коммутации;
- задачи построения структуры абонентской и межузловой сетей, включающей в себя определение емкости линий связи.

Рассмотренные и реализованные в ходе работы методы синтеза структуры сети обмена данными могут использоваться как для построения локальных сетей в пределах одного предприятия, так и для построения частей большой территориальной сети, состоящей из отдельных участков, осуществляющих обмен данных друг с другом через центральные узлы коммутации.

Список литературы: 1. Бондаренко М. Ф., Белоус Н. В., Руткас А. Г. Компьютерная дискретная математика.– Харьков: СМИТ, 2004.– 476 с. 2. Магзупов Т. М. Графы, сети, алгоритмы и их приложения.– Ташкент: Фан, 1990.– 120 с. 3. Макконелл Дж. Мир программирования. М: Техносфера, 2002.– 302 с. 4. Мизин А. И., Богатырев В. А., Кулешов А. П. Сети коммутации пакетов. М: Радио и связь, 1986.– 250 с.

Поступила в редколлегию 05.03.08

В. Б. УСПЕНСКИЙ, канд. техн. наук,
О. К. ЗВЯГИНЦЕВ, студент НТУ «ХПИ»

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ИЗБЫТОЧНОЙ СИСТЕМЫ НЕРАВНОТОЧНЫХ ДАТЧИКОВ

Розглянута задача визначення конфігурації надлишкової системи не рівноточних акселерометрів із умови мінімуму сукупної оцінки вимірюваної величини. Запропоновано метод її рішення.

Описана задача определения конфигурации избыточной системы неравноточных акселерометров из условия минимума совокупной оценки измеряемой величины. Предложен метод ее решения.

The problem of definition of a configuration of superfluous system not identical accuracy accelerometers from a condition of a minimum of a cumulative estimation of the measured size is described. The method of its decision is offered.

Введение. В настоящее время в технических устройствах широкое применение находят избыточные системы инерциальных датчиков, в частности, акселерометров. [1]

Для оценки трехмерного вектора ускорения, вообще говоря, достаточно измерений трех одноосных акселерометров, оси чувствительности которых не компланарны. Такую оценку будет называть «прямым измерением». При этом погрешность прямого измерения будет не меньше ошибки измерения самого «грубого» акселерометра. Учитывая, что в условиях эксплуатации реализуемая в запуске погрешность датчиков, как правило, неизвестна, в избыточной системе датчиков невозможно заранее выделить наиболее точную в данный момент тройку измерителей. [2] В этих условиях оценку трехмерного вектора ускорения целесообразно производить на основе комплексирования измерений всех имеющихся акселерометров, поскольку она может быть точнее, чем прямые измерения, осуществляемые с помощью трех датчиков. Таким образом, комплексирование информации от избыточного числа датчиков, как способ оценки трехмерного вектора, повышает точность измерения при худших реализациях инструментальных погрешностей, а также точность работы «в среднем» по результатам множества включений измерительной системы.

Постановка задачи. В данной работе рассматривается задача оптимизации конфигурации системы из четырех неравноточных акселерометров по критерию минимальной погрешности измерения проекции вектора ускорения на некоторое подпространство. Решение такой задачи позволяет подойти к проблеме размещения избыточного количества датчиков с позиций оптимизации «средней» точности измерений.

Определим термин «неравноточные датчики». В общем случае скалярное измерение векторной физической величины $\bar{a}$ одним датчиком можно представить в виде

$$\hat{a}(t) = \text{Pr}_v \bar{a}(t) + \delta a_0 + \delta a_t(t) + \xi(t), \quad (1)$$

где $\text{Pr}_v \bar{a}(t)$ – проекция измеряемой векторной величины на ось чувствительности датчика;

δa_0 – систематическая погрешность измерения, постоянная в данном запуске прибора и случайным образом с вероятностью, близкой к 1, реализуемая при включении прибора из диапазона $[-\delta a_{\max}; \delta a_{\max}]$;

$\delta a_t(t)$ – медленно меняющаяся в данном запуске погрешность измерения;

$\xi(t)$ – централизованная шумовая составляющая измерения.

Для первой компоненты погрешности измерения принято название «дрейф от запуска к запуску», для второй – «изменчивость дрейфа в запуске», для третьей – «случайный дрейф». При аттестации датчика, предшествующей его установке в измерительную систему, параметры перечисленных составляющих дрейфа оцениваются и, по возможности, частично компенсируются. Остаточный после такой компенсации дрейф имеет, вообще говоря, такую же трехкомпонентную структуру, а результатом компенсации является уменьшение изменчивости дрейфа в запуске.

В этих условиях под «неравноточными» будем понимать датчики, характеризующиеся существенно различным диапазоном $[-\delta a_{\max}; \delta a_{\max}]$, получаемым при аттестации акселерометра как воспроизводимая на большом количестве включений максимальная погрешность измерения эталонного ускорения. Отметим, что в текущем включении датчиков фактические погрешности могут оказаться меньше максимальных, и более того, наименее точный по нашим оценкам датчик, в данном запуске может давать наиболее точные измерения. Однако в условиях эксплуатации информация о фактической погрешности измерений отсутствует. Поэтому смысл рассматриваемой здесь задачи состоит в том, чтобы за счет конфигурации неравноточных датчиков обеспечить максимальную точность измерений при худших реализациях инструментальных погрешностей, а также «в среднем» по результатам множества запусков.

Предлагаемая методика оптимизации излагается на примере минимально избыточной системы, состоящей из 4 измерителей.

Пусть $\bar{n}_i = \text{col}(\cos \alpha_i \sin \theta_i; \cos \theta_i; \sin \alpha_i \sin \theta_i)$, $i = \overline{1,4}$ – единичный вектор, задающий направление i -й оси чувствительности акселерометра в осях базового ортогонального триэдра (см. рис. 1). Тогда измерение вектора

ускорения $\bar{a} = col(a_x, a_y, a_z)$ вдоль i -ой оси с учетом погрешности $|\delta a_i| \leq \delta a_i^{\max}$ можно представить в виде

$$a_i = a_x \cos \alpha_i \sin \theta_i + a_y \cos \theta_i + a_z \sin \alpha_i \sin \theta_i + \delta a_i, \quad (2)$$

где δa_i – фактическая погрешность датчика, реализованная в данном запуске, или в векторно-матричной форме

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} = A(\alpha, \theta) \cdot \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta a_1 \\ \delta a_2 \\ \delta a_3 \\ \delta a_4 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

в которой строки матрицы A – суть направляющие косинусы между вектором $\bar{n}_i$ и осями базового триэдра.

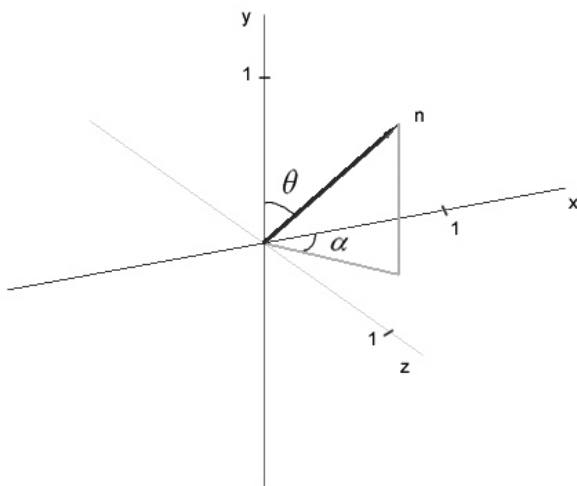


Рис. 1. Расположение оси чувствительности в осях базового триэдра

Алгоритм комплексирования измерений будем строить на основе метода наименьших квадратов. Тогда оценка трехмерного вектора ускорения в проекциях на оси базового триэдра вычисляется, как

$$\begin{bmatrix} \hat{a}_x \\ \hat{a}_y \\ \hat{a}_z \end{bmatrix} = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Нетрудно видеть, что ошибка такой оценки связана с четырехмерным вектором погрешности измерений соотношением

$$d\hat{a} = A^+(\alpha, \theta) \cdot \delta \bar{a}, \quad (5)$$

в котором $A^+(\alpha, \theta) = (ATA)^{-1} A^T$ – левая обратная матрица.

С учетом (4), задача определения оптимальной конфигурации избыточной системы измерителей по критерию минимума проекции вектора ошибок измерений на подпространство H формулируется в виде

$$\min_{\substack{\alpha_i, \theta_i \\ i=1,4}} \max_{|\delta \alpha_i| \leq \delta \alpha_i^{\max}} \|\text{Pr}_H(d\hat{a})\|^2. \quad (6)$$

Введенное в рассмотрение подпространство H , вообще говоря, может не совпадать с трехмерным евклидовым пространством E^3 . Практический интерес для инерциальной навигации представляет случай, когда H совпадает с «горизонтальной» плоскостью базового триэдра. В этом случае оптимальная конфигурация измерителей обеспечит минимальную погрешность измерения горизонтальной проекции вектора ускорения, что важно для точности инерциальной навигации в целом.

Максимальное значение f^* функции $\|\text{Pr}_H(d\hat{a})\|^2$, как положительно определенной квадратичной формы относительно $\delta \alpha_i, i = \overline{1,4}$, достигается на граничных значениях $\pm \delta \alpha_i^{\max}$. Что касается задачи (5) в целом, то она может быть решена только численно. Попутно отметим, что в условиях равноточных датчиков, т.е. когда все $\delta \alpha_i^{\max}$ одинаковы, точность оценки становится инвариантной к ориентации измерительных осей и задача оптимизации вырождается.

Дополним формулировку задачи (4), (5) для случая, когда измерительные оси попарно ортогональны. Такая задача, в частности, имеет место при использовании двух акселерометров, у каждого из которых по две ортогонально направленных оси чувствительности.

В этом случае (4), (5) дополняются связями

$$\begin{aligned}(n_1 \cdot n_2) &= 0 \\ (n_3 \cdot n_4) &= 0.\end{aligned}\quad (7)$$

Таким образом, задача определения оптимальной конфигурации формулируется в виде минимаксной задачи (5), решаемой с учетом (6).

Приведем пример решения, полученного численно.

Пусть $\delta a_i^{\max}$ соответственно равны $\delta a_1^{\max} = 0.402 \frac{M}{c^2}$,

$$\delta a_2^{\max} = 0.142 \frac{M}{c^2}, \delta a_3^{\max} = 0.035 \frac{M}{c^2}, \delta a_4^{\max} = 0.193 \frac{M}{c^2}.$$

Приведенные значения получены в результате паспортизации пары двухосных микромеханических акселерометров типа ADXL203. В этом случае оптимальная конфигурация определяется углами, приведенными в табл. 1, и сориентирована относительно базовых осей, как на рис. 2.

Таблица 1

Оптимальная конфигурация осей чувствительности

	1-я измерительная ось	2-я измерительная ось	3-я измерительная ось	4-я измерительная ось
α°	66	-24	1	-130
θ°	86	86	6	86

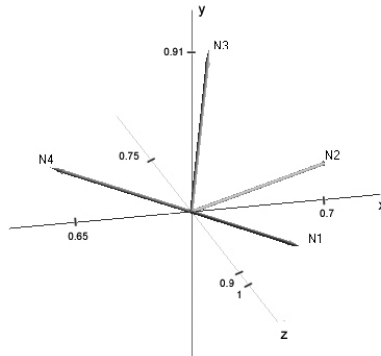


Рис. 2. Оптимальное расположение осей чувствительности

Для оценки эффективности полученного решения приведем значения функции f^* для некоторых «тривиальных» схем, в которых измерительные оси коллинеарны базовым (в табл. 2).

Таблица 2

Значение f^* для некоторых «тривиальных» систем

1-я измерительная ось	2-я измерительная ось	3-я измерительная ось	4-я измерительная ось	Значение функции $\sqrt{f^*}$
Ox	Oy	Oz	Ox	0.33
Ox	Oy	Oz	Oy	0.44
Ox	Oz	Oy	Ox	0.33
Ox	Oz	Oy	Oz	0.44
Oy	Ox	Oz	Oy	0.33
Oy	Oz	Ox	Oy	0.33
Oy	Oz	Ox	Oz	0.44
Oz	Ox	Oy	Ox	0.44
Oz	Ox	Oy	Oz	0.33
Oz	Oy	Ox	Oy	0.44
Oz	Oy	Ox	Oz	0.33
Оптимальная конфигурация				0.14

Выводы. Таким образом, оптимальная конфигурация обеспечивает существенное уменьшение ошибку оценки ускорения при реализации худших значений инструментальных погрешностей в избыточной системе акселерометров. Недостатком полученного решения является технологическая сложность реализации произвольной ориентации измерительных осей. Для преодоления такого недостатка предлагается проводить оптимизацию введенного критерия на множестве технологически «простых» схем. Как видно из табл. 2, такими схемами является конфигурации, в которых самая «грубая» ось (первая) коллинеарна какой-либо оси второго акселерометра.

Заключение. Таким образом, при выборе конфигурации избыточной системы неравноточных датчиков предлагается учитывать точностные характеристики комплексной оценки, построенной на совместной обработке измерений всех датчиков. Реализация предлагаемой методики обеспечивает повышение точности измерений в таких системах.

Список литературы: 1. Волович А., Волович Г. Интегральные акселерометры.– Компоненты и технологии №1, 2002.– С. 66-70. 2. Чесноков Г.И., Поликовский Е.Ф. и др. Некоторые пути улучшения тактико-технических характеристик бесплатформенных инерциальных навигационных систем // Материалы X Международной конференции по интегрированным системам.– С.-Петербург, 2003. – С. 155-164

Поступила в редколлегию 24.03.09

Г. Л. ГРИНБЕРГ, канд. техн. наук, доцент НТУ «ХПИ»,
М. Л. ЛЮБЧИК, студентка НТУ «ХПИ»

ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ФУНКЦИЙ ПРЕДПОЧТЕНИЯ В ЗАДАЧАХ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ЭКСПЕРТНОГО ОЦЕНИВАНИЯ

Розглядається задача ідентифікації нелінійної функції переваг експертів на основі вимірюваних часткових показників. Для відновлення функції переваг використано метод опорних векторів і ядерних апроксимацій. Отримано вирішення задачі узгодження функції переваг з експертними оцінками вагових коефіцієнтів часткових показників.

Рассматривается задача идентификации нелинейной функции предпочтения экспертов на основе измеряемых частных показателей. Для восстановления функции предпочтения используется метод опорных векторов и ядерных аппроксимаций. Получено решение задачи согласования функции предпочтения с экспертными оценками весовых коэффициентов частных показателей.

The problem of nonlinear evaluation function identification using the measured partial indexes is considered. For the evaluation function recovery support vector method as well as kernel approximation are used. The solution of evaluation function coordination with the expert estimations of partial indexes weight coefficients is obtained.

Введение. Одним из хорошо известных и широко используемых на практике подходов к сравнительной оценке и упорядочиванию объектов (альтернатив) в задачах многокритериального принятия решений является построение так называемой оценочной функции, аппроксимирующей функцию предпочтения экспертов и позволяющей свести множество частных показателей (критериев) к одному обобщенному [1,2]. На практике достаточно часто используются модели оценочных функций в виде линейной свертки частных показателей, в которой веса задаются экспертами. Альтернативой является непосредственная экспертная оценка некоторого комплексного обобщенного показателя (так называемого интегрального индикатора) на основе наблюдаемых (измеряемых) значений частных показателей. Возможное противоречие между экспертными оценками весов частных критериев в их линейной свертке и экспертными оценками интегральных показателей разрешается с помощью процедур оптимального согласования [2,3], позволяющих осуществить одновременную коррекцию экспертных оценок весов частных показателей и оценок обобщенного показателя с целью выработки согласованного решения.

Использование простейшей линейной свертки не всегда адекватно отражает фактические предпочтения экспертов, которые в реальных ситуациях могут иметь достаточно сложный характер, выражаемый априори неизвестной нелинейной зависимостью обобщенного показателя от значений частных показателей. Для решения подобных задач предлагались методы,

основанные на многомерной полиномиальной аппроксимации оценочной функции [4], однако при этом остается открытым вопрос о выборе системы аппроксимирующих полиномов, обеспечивающей достаточно высокую точность аппроксимации в условиях ограниченной исходной информации.

В настоящей работе рассматривается решение задачи идентификации нелинейной функции предпочтения экспертов на основе измеряемых значений частных показателей с целью нахождения зависимости сформированного экспертами обобщенного показателя от частных критериев. Для восстановления искомых зависимостей предлагается использовать метод опорных векторов и ядерных аппроксимаций [5], что позволяет существенно уменьшить число оцениваемых параметров модели и, в условиях ограниченности исходных данных (малая выборка), обеспечить возможность восстановления сложных нелинейных функций предпочтения экспертов. При этом экспертная оценка весов линейной свертки частных показателей, рассматриваемой как первое приближение к модели нелинейной оценочной функции, используется в качестве априорной информации, позволяющей оптимальным образом согласовать полученную нелинейную модель с экспертной оценкой сравнительной важности частных показателей.

Постановка задачи согласованной идентификации функции предпочтения. Рассматривается множество однотипных объектов (альтернатив) $\mathfrak{Z} = \{v_1, \dots, v_n\}$ и множество частных показателей $\mathfrak{R} = \{p_1, \dots, p_m\}$. Каждый объект v_i характеризуется вектором объективно наблюдаемых (измеряемых) значений показателей $x_i^T = (x_i^1, \dots, x_i^m)$, где x_i^j - измеренное значение j -того показателя для i -того объекта. Набор наблюдений представляется в виде матрицы исходных данных $X_n = \{x_i^j\}_{i,j=1}^{n,m}$.

Обобщенным показателем объекта v_i называется скалярная величина $J(x_i)$, поставленная в соответствие вектору измеренных значений его частных показателей x_i . Предполагается, что группа экспертов на основе имеющихся исходных данных измерений и собственных предпочтений формирует вектор оценок обобщенного показателя для каждого объекта $q_n^T = (q_1, \dots, q_n)$ и вектор весов частных показателей $w^T = (w_1, \dots, w_m)$, имеющих смысл априорных экспертных оценок их относительной важности. Необходимо на основе имеющихся данных измерений частных показателей X_n восстановить оценочную функцию $J(x)$, задающую модель функции предпочтения, оптимально согласованную с имеющимися экспертными оценками $\{q_n, w\}$ и реализующую нелинейную свертку частных показателей.

С целью формализации понятия оптимального согласования рассмотрим вначале задачу согласования экспертных оценок в случае линейной свертки частных показателей.

Оптимальное согласование экспертных оценок в задаче линейной свертки. С использованием имеющихся данных измерений частных показателей в предположении о линейном характере функции предпочтений нетрудно осуществить взаимный пересчет экспертных оценок обобщенных показателей рассматриваемых объектов и весов частных показателей:

$$(q_n, w) \xrightarrow{X_n} (q = X_n w, w_n = X_n^+ q_n). \quad (1)$$

Очевидно, что в общем случае $q_n \neq q$, $w \neq w_n$. Экспертные оценки называются *согласованными*, если для них выполняется условие $\bar{q} = X_n \bar{w}$. Согласно доказанной в [3] теореме согласования существуют такие числа $\alpha, \beta \in [0,1]$, для которых векторы $w_\alpha = \alpha w + (1-\alpha)w_n$, $q_\beta = \beta q + (1-\beta)q_n$ удовлетворяют условию $q_\beta = X_n w_\alpha$. Очевидно, что существует множество векторов, удовлетворяющих указанному условию.

Экспертные оценки будем называть *оптимально согласованными*, если они минимизируют функционал вида:

$$M(q, w) = \frac{1}{2} \|q_n - q\|^2 + \frac{1}{2} \gamma \|(w - w_0)\|^2 \quad (2)$$

при наличии ограничений $q = X_n w$, $e^T w = 1$, учитывающих очевидную связь экспертных оценок для линейной функции предпочтения и требование нормировки весовых коэффициентов. Здесь w_0 - вектор априорных значений весовых коэффициентов линейной свертки частных показателей, γ - весовой коэффициент, учитывающий относительную степень доверия к экспертным оценкам обобщенного показателя и априорных весовых коэффициентов.

Решение задачи (2) может быть получено с помощью функции Лагранжа

$$L(q, w, \lambda, \mu) = M(q, w) + \lambda^T (q_n - X_n w) + \mu(1 - e^T w), \quad (3)$$

где λ, μ - множители Лагранжа.

Воспользовавшись условиями оптимальности в форме Куна - Таккера, нетрудно получить непосредственную связь между оптимальными значениями множителей Лагранжа $\mu = m^{-1} e^T X_n^T \lambda$, $\lambda = P^{-1}(q_n - X_n w_0)$, где $P_n = \gamma I_n + X_n \Pi X_n^T$, $\Pi_m = I_m - m^{-1} e e^T$.

С учетом полученных соотношений, решение задачи оптимального согласования экспертных оценок может быть получено в следующем виде:

$$\bar{w} = w_0 + \Pi_m X_n^T P_n^{-1} (q_n - X_n w_0), \quad \bar{q} = X_n w_0 + \Psi_n P_n^{-1} (q_n - X_n w_0), \quad (4)$$

где $\Psi_n = X_n \Pi_m X_n^T$, $P = \gamma I_n + \Psi_n$.

Очевидно, что имеют место следующие предельные соотношения: $\gamma \rightarrow 0: \bar{w} = X_n^+ q_n$, $\gamma \rightarrow \infty: \bar{w} = w_0$, отражающие крайние случаи формирования вектора весов линейной свертки частных показателей: при полном отсутствии априорной информации ($\gamma = 0$) и при полном доверии к априорным оценкам весовых коэффициентов ($\gamma = \infty$).

Идентификация нелинейной функции предпочтения. Примем модель нелинейной функции предпочтения в виде $J(x) = \varphi^T(x)c$, где $c^T = (c_1, \dots, c_M)$ - вектор подлежащих определению неизвестных параметров модели, $\varphi^T(x) = (\varphi_1(x), \dots, \varphi_M(x))$ - вектор координатных функций, однозначно связанных с некоторой симметрической положительно определенной ядерной функцией $K(x, x_i) = \varphi^T(x)\varphi(x_i)$, в качестве которой выберем радиально-базисную функцию $K(x, x_i) = \exp(-\mu\|x - x_i\|^2)$, где $\mu > 0$ - параметр функции.

В соответствии с принятой моделью формирования экспертных оценок значений обобщенного показателя $q_n^T = (q_1, \dots, q_n)$, $q_i = J(x_i) + \xi_i$, $i = \overline{1, n}$, где ξ_i - погрешности экспертного оценивания, уравнение связи экспертных оценок с измеренными частными показателями имеет вид:

$$q_n = \Phi_n c + \xi, \quad \Phi_n^T = (\varphi(x_1), \dots, \varphi(x_n)), \quad \xi = (\xi_n, \dots, \xi_n). \quad (5)$$

В соответствии с методом опорных векторов [5] найдем оценки неизвестных параметров модели путем решения задачи условной минимизации регуляризованного функционала

$$I(c) = \frac{1}{2} \|\xi\|^2 + \frac{1}{2} \gamma \|c - c_0\|^2, \quad \xi = q_n - \Phi_n c, \quad (6)$$

где c_0 - вектор априорных значений параметров модели, $\gamma > 0$ - параметр регуляризации, обеспечивающий устойчивость процедуры оценивания.

Эквивалентная сопряженная оптимизационная задача может быть сформулирована с использованием функции Лагранжа вида $L(c, \xi, \lambda) = I(c) + \lambda^T (q - \Phi_n c - \xi)$, где $\lambda^T = (\lambda_1, \dots, \lambda_n)$ - вектор сопряженных переменных (множителей Лагранжа).

Записывая условия оптимальности для сопряженной задачи, получим выражения для оптимальных оценок неизвестных параметров модели и сопряженных переменных:

$$\begin{aligned} c^* &= c_0 + \gamma^{-1} \Phi_n^T \lambda^*, \quad \lambda^* = \gamma A_\gamma^{-1} (q_n - \Phi_n c_0), \\ A_\gamma &= \gamma I_n + K_n, \quad K_n = \Phi_n \Phi_n^T = \{K(x_i, x_j)\}_{i,j=1}^{n,n}. \end{aligned} \quad (7)$$

где I_n - единичная матрица. Заметим, что оценки параметров модели существенным образом зависят от вектора c_0 априорных значений параметров модели функции предпочтения.

Оптимальное согласование модели нелинейной функции предпочтения. Полученные оценки параметров модели функции предпочтения зависят от вектора априорных значений оцениваемых параметров c_0 , для выбора которого естественно воспользоваться имеющейся информацией об экспертных оценках вектора весов w , определяющих относительную важность частных критериев. Трактую линейную свертку критериев как первое приближение к построению нелинейной модели функции предпочтения, выберем оптимальные априорные значения параметров модели из условия наилучшего приближения вектора априорных оценок обобщенного показателя $q_0 = \Phi_n c_0$ к вектору прогнозируемых значений их экспертных оценок, полученных на основе линейной свертки измерений частных критериев. Очевидно, что указанный вектор прогнозных значений задается соотношением $\tilde{q}_n = X_n w$.

Для нахождения вектора априорных значений искомых параметров модели функции предпочтения, оптимальным образом согласованного с экспертными оценками весов частных критериев w , рассмотрим задачу условной оптимизации вспомогательного регуляризованного функционала:

$$I_0(c_0) = \frac{1}{2} \|\zeta\|^2 + \frac{1}{2} \omega \|c_0\|^2, \quad \zeta = \tilde{q}_n - q_0 = X_n w - \Phi_n c_0. \quad (8)$$

Используя функцию Лагранжа $L(c_0, \zeta, v) = I_0(c_0) + v^T (X_n w - \Phi_n c_0 - \zeta)$, где $v^T = (v_1, \dots, v_n)$ - вектор сопряженных переменных, $\omega > 0$ - параметр регуляризации, получим решение задачи условной оптимизации (8):

$$c_0^* = \omega^{-1} \Phi_n^T v^*, \quad v^* = \omega A_\omega^{-1} X_n w, \quad A_\omega = \omega I_n + K_n. \quad (9)$$

Окончательно, с учетом (7), (9) выражение для функции предпочтения, оптимально согласованной с имеющимися экспертными оценками, приобретает следующий вид:

$$\hat{J}_n(x) = \varphi^T(x) \Phi_n d, \quad d = [A_\gamma^{-1} q_n + (I_n - A_\gamma^{-1} K_n) A_\omega^{-1} X_n w]. \quad (10)$$

С учетом очевидного соотношения $\varphi^T(x) \Phi_n = (K(x, x_1), \dots, K(x, x_n))$, окончательно полученная оценка функции предпочтения может быть представлена в виде линейной комбинации ядерных функций, вычисленных в точках пространства векторов частных показателей, соответствующих их измеренным значениям:

$$\hat{J}_n(x) = \sum_{i=1}^n d_i K(x, x_i), \quad d = (d_1, \dots, d_n), \quad (11)$$

где коэффициенты d_i линейной комбинации зависят от матрицы исходных данных X_n и экспертных оценок $\{q_n, w\}$. Таким образом, формула (11) задает, фактически, искомую нелинейную свертку частных показателей, определяемую их измеренными значениями и оптимальным образом согласованную с экспертными оценками обобщенного показателя.

Следует отметить, что полученные оценки зависят только от симметрической квадратной $(n \times n)$ матрицы K_n , состоящей из ядерных функций, определенных в точках наблюдений, вследствие чего вычисление оценок связано с обращением хорошо обусловленных матриц. В окончательную формулу не входят в явном виде координатные функции $\{\varphi_i(x)\}$, что устраняет необходимость в их предварительном выборе. При этом возникает возможность аппроксимации достаточно сложных функций предпочтения, причем количество оцениваемых параметров модели не превышает числа наблюдений. В дальнейшем полученная зависимость может использоваться для оценивания обобщенных показателей новых объектов без участия экспертов.

Заключение. Предложенный подход позволяет рассматривать задачу нелинейной свертки критериев как задачу идентификации неизвестной функции предпочтения экспертов на основе обучающей выборки наблюдений частных показателей. Рассмотренной схеме идентификации можно сопоставить соответствующую нейросетевую структуру с радиально-базисными активационными функциями и весами, соответствующими оцениваемым параметрам модели. При этом при наличии достаточно большой обучающей выборки для настройки весов можно использовать алгоритмы обучения искусственных нейронных сетей. Отдельной задачей является выбор параметров регуляризации и параметров используемых ядерных функций. Для ее решения необходимо ввести в рассмотрение дополнительный критерий верхнего уровня, использующий, например, процедуру скользящего контроля [6].

Список литературы. 1. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика и основы эконометрики. - М.: ЮНИТИ, 1998. - 393 с. 2. Литвак Б.Г. Экспертная информация: Методы получения и анализа. - М.: Радио и связь, 1982. - 265 с. 3. Стрижов В.В. Согласование экспертных оценок для биосистем в экстремальных условиях // Сообщения по прикладной математике. - М.: ВЦ РАН, 2002. - 41 с. 4. Васильев С.Н., Селедкин А.П. Синтез функции эффективности в многокритериальных задачах принятия решений // Известия АН СССР, Техническая кибернетика. - 1980. - № 3. - С. 186 - 190. 5. Vapnik V.N. The Nature of Statistical Learning Theory. Springer-Verlag, New York, 1995. 6. Вапник В.Н. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным. - М.: Наука, 1979. - 265 с.

Поступила в редколлегию 24.03.09

Л. М. ЛЮБЧИК, д-р техн. наук, проф., зав. каф. КМММ НТУ «ХПИ»,
С. А. ШПАТЕНКО, канд. техн. наук

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭНЕРГОРЫНКА МЕТОДОМ РАЗДЕЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЙ

В статті пропонуються методика аналізу динамічних процесів у моделі енергоринку з урахуванням особливості стратегій ціноутворення. З використанням методу сингулярних збурень та розподілу рухів отримано рівняння повільних та швидких рухів.

В статье предлагается методика анализа динамических процессов в модели энергорынка с учетом особенностей стратегий ценообразования. С использованием метода сингулярных возмущений и разделения движений получены уравнения быстрых и медленных движений.

In the paper the method of dynamic processes in power market model is proposed taking into account the bidding strategies features. Using the singular perturbation and motion separation methods equations for both slow and fast motions are obtained.

Введение. Становление рынка электроэнергии является важнейшей составляющей развития экономики, поскольку энергетическая отрасль является основой устойчивого функционирования промышленного и коммунально-бытового сектора. Внедрение в отрасли рыночных отношений подразумевает экономическую самостоятельность субъектов энергорынка - генерирующих, распределительных и сбытовых компаний, а также потребителей. Особенности энергорынка являются уникальность электроэнергии как продукта, для которого характерна одновременность процессов производства, передачи и потребления, а также принципиальная нескладируемость электроэнергии, вследствие чего участники энергорынка вынуждены сообща стремиться к поддержанию баланса в системе.

Создание рынка электроэнергии подразумевает внедрение конкурентных отношений в электроэнергетике, основанных на договорных механизмах ценообразования. При этом используются как двусторонние договора купли-продажи электроэнергии по оговоренным сторонами ценам и объемам, так и механизмы конкурентного ценообразования, реализуемые на основе аукционов ценовых заявок покупателей и продавцов электроэнергии. В результате возникает балансирующий рынок электроэнергии, обеспечивающий оптимальное согласование потребностей производителей и потребителей с учетом изменяющегося спроса.

Исследование процессов, происходящих на энергорынке, возможно на основе методов математического моделирования с учетом характерных особенностей его функционирования [1,2]. В настоящей статье предлагается математическая модель энергорынка и анализируются процессы динамики изменения цен и объемов производства и потребления электроэнергии.

Постановка задачи анализа модели энергорынка. Рассматривается математическая модель энергорынка, состоящего из n_s поставщиков (supplier) - генерирующих компаний, характеризующихся текущим объемом производства электроэнергии $q_s^i(t)$, $i = \overline{1, n_s}$, и n_c компаний - потребителей (customer), характеризующихся объемом потребления электроэнергии $q_c^i(t)$, $i = \overline{1, n_c}$, расходуемой на производство товаров и услуг.

Рассматриваемая модель основана на предположении, что темпы изменения объемов производства электроэнергии i -м поставщиком пропорциональны разности между доходом от реализации произведенной им электроэнергии и стоимости ее производства, а темпы изменения объемов потребления i -м потребителем пропорциональны разности между его доходом от реализации произведенных товаров и услуг и затратами на покупку необходимой для этого электроэнергии.

В соответствии с рыночным механизмом ценообразования предполагается, что скорость изменения цены пропорциональна разности между суммарным текущим объемом произведенной электроэнергии и суммарным объемом ее потребления.

Тогда рассматриваемая модель энергорынка может быть представлена в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{q}_s^i(t) &= -a_s^i q_s^i(t) - r_s^i + \pi(t) \cdot b_s^i q_s^i(t) + v_s^i, \quad i = \overline{1, n_s}, \\ \dot{q}_c^i(t) &= a_c^i q_c^i(t) + r_c^i - \pi(t) \cdot b_c^i q_c^i(t) + v_c^i, \quad i = \overline{1, n_c}, \\ \mu \dot{\pi}(t) &= \sigma(t) = \sum_{i=1}^{n_c} q_c^i(t) - \sum_{i=1}^{n_s} q_s^i(t) = Q_c(t) - Q_s(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где $a_s^i q_s^i(t) + r_s^i$ - текущая стоимость производства i -м поставщиком;

$a_c^i q_c^i(t) + r_c^i$ - текущий доход i -го потребителя;

$\pi(t)$ - текущая рыночная цена электроэнергии;

v_s^i, v_c^i - инвестиции в расширение производства и потребления;

μ - коэффициент релаксации рынка, характеризующий скорость реакции цены на дисбаланс спроса и предложения.

Приведенная модель ценообразования является очевидной идеализацией реальных процессов. Значительно более реалистичной является модель стратегии ценообразования, учитывающая реакцию изменения цены не только на дисбаланс спроса и предложения, но и на скорость его изменения, а также инерционность ценовой динамики. Примем указанную модель в виде:

$$\mu[\tau \cdot \ddot{\pi}(t) + \dot{\pi}(t)] = T \cdot \dot{\sigma}(q(t)) + \sigma(q(t)), \quad (2)$$

где T, τ - постоянные времени динамической модели ценообразования.

Представим уравнения (1), (2) в эквивалентной матричной форме:

$$\begin{aligned}\dot{q}_s(t) &= -A_s q_s(t) + \pi(t) \cdot B_s q_s(t) + d_s, \\ \dot{q}_c(t) &= A_c q_d(t) - \pi(t) \cdot B_c q_c(t) + d_c, \\ \mu[\tau \cdot \ddot{\pi}(t) + \dot{\pi}(t)] &= T \cdot \dot{\sigma}(q(t)) + \sigma(q(t)),\end{aligned}\tag{3}$$

где $d_s = v_s - r_s$, $d_c = v_c + r_c$, $\sigma(q(t)) = e_d^T q_d(t) - e_s^T q_s(t)$.

Анализ модели (3), включающий в себя построение переходных и установившихся процессов, вызывает существенные затруднения в связи с ее нелинейным характером и наличием так называемых разнотемповых движений, обусловленных тем, что изменение объемов производства электроэнергии в условиях конкуренции обычно более инерционно по сравнению с динамикой изменения цены. В этой связи проведем анализ модели (3) методом сингулярных возмущений в предположении, что $\mu \ll 1$.

Анализ быстрых и медленных движений. В соответствии с методикой разделения движений [3] рассмотрим медленные процессы изменения объемов производства и потребления электроэнергии и цены $\bar{q}_s(t)$, $\bar{q}_c(t)$, $\bar{\pi}(t)$, описываемые уравнениями порождающей задачи при $\mu = 0$, и быстрые движения изменения отклонений цены $\tilde{\pi}(t)$.

Уравнения медленных движений в матричной форме имеют вид:

$$\begin{aligned}\dot{\bar{q}}(t) &= [A + \bar{\pi}(\bar{q}(t)) \cdot B] \cdot \bar{q}(t) + d, \\ A &= \begin{pmatrix} -A_s & 0 \\ 0 & A_d \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} B_s & 0 \\ 0 & -B_d \end{pmatrix}, \quad q^T = (q_s^T, q_c^T), \quad d^T = (d_s^T, d_c^T).\end{aligned}\tag{4}$$

Медленные процессы, описываемые уравнением (4), соответствуют движению по нестационарному инвариантному многообразию вида:

$$T \cdot \dot{\sigma}(\bar{q}(t)) + \sigma(\bar{q}(t)) = 0,\tag{5}$$

что имеет место при изменении медленной составляющей цены по закону:

$$\bar{\pi}(t) = (b^T \bar{q}(t))^{-1} \cdot (a^T \bar{q}(t) + T^{-1} \cdot \bar{e}^T \bar{q}(t) + \delta),\tag{6}$$

где $a^T = (e_s^T A_s, e_c^T A_c)$, $b^T = (e_s^T B_s, e_c^T B_c)$, $\delta = e_c^T d_c - e_s^T d_s$, $\bar{e}^T = (-e_s^T, e_c^T)$, e_s^T, e_c^T - единичные векторы соответствующих размерностей.

Очевидно, что при $v_s^i > r_s^i$, $i = \overline{1, n_s}$, оператор системы (4) является внедиагонально положительным, вследствие чего ее решения лежат в конусе $\mathbf{R}_+^{n_s + n_c}$ и являются вектор-функциями с положительными компонентами [4].

В установившемся режиме имеет место предельное балансное соотношение $\sigma(\bar{q}) = 0$, соответствующее равенству суммарных объемов производства и потребления $\bar{Q}_s = \bar{Q}_c$, при этом установившееся значение цены определяется формулой $\bar{\pi} = (b^T \bar{q})^{-1} \cdot (a^T \bar{q} + \delta)$.

Соответствующие установившиеся значения объемов производства и потребления могут быть найдены из системы алгебраических уравнений

$$[(b^T \bar{q}) \cdot A + (a^T \bar{q} + \delta) \cdot B + db^T] \cdot \bar{q} = 0, \quad (7)$$

для решения которой может быть использована вычислительная процедура:

$$\begin{aligned} q_{k+1} &= -[\beta(q_k) \cdot A + \alpha(q_k) \cdot B]^{-1} [\delta B_k + \beta(q_k) d], \\ \alpha(q_k) &= a^T q_k, \quad \beta(q_k) = b^T q_k, \quad q_0 > 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Нетрудно убедиться, что быстрая составляющая процесса изменения цены описывается дифференциальным уравнением

$$\ddot{\pi}(t) + \dot{\pi}(t) + \mu^{-1} T (b^T \bar{q}(t)) \cdot \tilde{\pi}(t) = \mu^{-1} [\bar{e}^T \bar{q}(t) + T (a^T \bar{q}(t)) + T \cdot \delta] \quad (7)$$

и является устойчивой, вследствие чего многообразие (5) является притягивающим, что гарантирует выполнение балансного условия $\sigma(\bar{q}) = 0$.

Заключение. Предложенный подход, основанный на использовании сингулярно- возмущенных моделей, позволяет существенно упростить анализ переходных и установившихся процессов в динамических моделях энергорынка и получить уравнения для равновесных цен и объемов производства и потребления электроэнергии. При этом возникает возможность постановки и решения задачи оптимизации инвестиций и стратегии ценообразования из условия обеспечения заданного качества переходных и установившихся процессов производства и потребления электроэнергии в условиях изменяющегося спроса. Дальнейшие исследования должны быть направлены на установление условий устойчивости уравнений медленных движений и построение областей устойчивости в пространстве параметров модели, а также на нахождение условий разрешимости уравнений для установившихся режимов.

Список литературы: 1. David A. K., Wen F. Strategic Bidding in Competitive Electricity Markets: A Literature Survey // Proceedings of IEEE Power Engineering Society. - 2000 Summer Meeting, Seattle, USA, July 15-20. - 2000. - Pp. 124-128. 2. Ni E., Luh P. B., Rourke S. Optimal integrated generation bidding and scheduling with risk management under a deregulated power market // IEEE Transactions on Power Systems. - Vol. 19. - No. 1. - 2004. - Pp. 56-64. 3. Воронов А. А. Введение в динамику сложных управляемых систем. - М.: Наука, 1985. - 352 с. 4. Опоицев В. И. Нелинейная системостатика. - М.: Наука, 1986. - 248 с.

Поступила в редколлегию 23.03.09

И. А. БАГМУТ, ассистент кафедры СПУ НТУ «ХПИ»

К ВОПРОСУ О МЕРЕ НАБЛЮДАЕМОСТИ

Розглянуто основні відомі кількісні характеристики спостережуваності. Уведено дві нові кількісні характеристики, що дозволяють судити про ступінь спостережуваності координат вектора стану досліджуваної системи. Проаналізовано використання уведених кількісних характеристик спостережуваності на прикладі дослідження спрощеної моделі помилок автономної навігації в горизонтальній площині, а також проведене порівняння розглянутих мір спостережуваності.

Рассмотрены основные известные количественные характеристики наблюдаемости. Введены две новые количественные характеристики, позволяющие судить о степени наблюдаемости координат вектора состояния исследуемой системы. Проанализировано использование введенных количественных характеристик наблюдаемости на примере исследования упрощенной модели ошибок автономной навигации в горизонтальной плоскости, а также проведено сравнение рассмотренных мер наблюдаемости.

The main known quantitative performances of an observability surveyed. Two new quantitative performances are injected, permitting to judge extent of an observability of coordinates of state vector of a researched system. Use of injected quantitative performances of an observability on an instance of research of the simplified model of errors of autonomous horizontal plane navigation is analyzed, and also comparison of the surveyed measures of an observability is carried out.

Введение. Наблюдаемость координат вектора состояния системы является необходимым условием для их эффективной оценки [1]. Поэтому перед синтезом оценивающего устройства, например, наблюдающего устройства идентификации [2] или фильтра Калмана (ФК) [2], необходимо исследовать систему на наблюдаемость. Для этого можно воспользоваться известными критериями, основанными на построении и анализе так называемой матрицы наблюдаемости системы [3], например критерием Калмана в случае линейной стационарной системы, локальным и интегральным критериями для линейной нестационарной системы. Если система вполне наблюдаема, можно приступить к построению устройства оценивания. В противном случае необходимо выявить ненаблюдаемые координаты, например с помощью методов, рассмотренных в [4, 5]. Далее если ненаблюдаемые координаты являются обнаруживаемыми [6, 7], то также можно приступить к синтезу оценивающего устройства. Если же ненаблюдаемые координаты не являются обнаруживаемыми и априори в целом существенно влияют на ошибку оценки вектора состояния системы, нужно модифицировать систему, например, расширив ее вектор измерения. Иначе, можно выполнить редукцию устройства оценивания, исключив из его вектора состояния ненаблюдаемые координаты, тем самым, повысив эффективность оценки остальных координат [1]. Однако на практике между слабо наблюдаемыми и ненаблюдаемыми координатами практически нет

разницы [1]. Также не всегда можно заранее определить, какие именно координаты будут в целом сильно или слабо влиять на точность оценивания вектора состояния системы. В этих условиях становится актуальной проблема определения слабо и хорошо наблюдаемых координат. Непосредственное использование указанных критериев наблюдаемости не решает данную проблему. Для этого необходимо вначале формализовать понятия “хорошо наблюдаемая координата”, “слабо наблюдаемая координата” и т.п. Для этого нужно ввести соответствующую количественную характеристику наблюдаемости. Такую характеристику называют мерой наблюдаемости [1, 8, 9]. Используя такую меру, можно определить слабо и хорошо наблюдаемые координаты и принять решение о реструктуризации системы для повышения эффективности оценивания ее вектора состояния.

Анализ последних исследований и публикаций. Определение того, каким образом мера должна количественно характеризовать наблюдаемость системы или отдельной компоненты вектора ее состояния является нетривиальной задачей. Поэтому существуют различные подходы к ее решению. В работах [1, 8, 9] описаны характеристики, позволяющие количественно судить о наблюдаемости компонент вектора состояния исследуемой системы.

Постановка задачи. Решаемой в работе задачей является введение и обоснование двух новых количественных характеристик наблюдаемости и сравнение их с известными [1, 8, 9].

Изложение материала. Задача наблюдения формулируется следующим образом [4]. Рассматривается линейная система, функционирование которой подчиняется следующим уравнениям:

$$\dot{x} = A(t) \cdot x, \quad (1)$$

$$z = H(t) \cdot x, \quad (2)$$

где x – n -мерный вектор состояния системы, $A(t)$ – матрица динамики системы размера $n \times n$, z – m -мерный вектор измерений, $H(t)$ – матрица связи (измерения) размера $m \times n$.

Необходимо оценить вектор состояния системы x , на основе измерения z . В нашем случае на основании структуры и значений матриц $A(t)$ и $H(t)$ необходимо выявить слабо и хорошо наблюдаемые (оцениваемые) координаты вектора x . Рассмотрим сначала уже некоторые существующие количественные характеристики наблюдаемости, которые можно использовать для решения данной задачи.

Детерминированная мера наблюдаемости. Данная мера введена Н. А. Парусниковым и его соавторами [9]. Для простоты предположим, что

исследуемая система, задаваемая уравнениями (1), (2) является стационарной, а также имеет скалярный выход. В этом случае уравнение (2) примет вид

$$z = H \cdot x,$$

где $\bar{x}$ – n -мерный вектор состояния системы, z – скалярное измерение, H – матрица-строка измерения системы размером $1 \times n$.

Введем векторы $a_1 = H^T$, $a_2 = A^T \cdot a_1, \dots$, $a_n = A^T \cdot a_{n-1}$. Выполним рекуррентную процедуру ортогонализации Грамма-Шмидта, согласно которой векторы $a_1, a_2, \dots, a_n$ последовательно преобразуются в векторы $u_1, u_2, \dots, u_j, \dots$ такие, что:

$$|u_j| = 1 \text{ при } u_j \neq 0; u_j \perp u_{j-1} \perp \dots \perp u_1,$$

$$u_1 = a_1 / |a_1|, u_{j+1} = (a_{j+1} - a_{j+1}^*) / |a_{j+1} - a_{j+1}^*|,$$

$$\text{где } a_{j+1}^* = \sum_k^j (a_{j+1}^T \cdot u_k) \cdot u_k.$$

При этом если в процессе ортогонализации величина $|a_{j+1} - a_{j+1}^*|$ оказывается равной нулю, данный процесс заканчивается, и набор векторов $\{u_1, u_2, \dots, u_j\}$ будет представлять базис наблюдаемого подпространства системы. Далее введем замену переменных:

$$y = U \cdot x, \dot{y} = F \cdot y, z = y_1,$$

где $U = (u_1 \ u_2 \ \dots \ u_j)^T, (j \leq n)$.

Матрица $F = U \cdot A \cdot U^{-1}$ имеет квазистреугольную форму. Абсолютные значения элементов $f_{k-1,k}$ ($k = \overline{2, j}$) верхней квазидиагонали данной матрицы и представляют меру наблюдаемости k -х координат вектора y :

$$\mu_k = |f_{k-1,k}|. \quad (3)$$

Здесь μ_k – мера наблюдаемости координаты y_k .

Аддитивная погрешность в измерении z входит в ошибку оценки y_k с множителем обратно пропорциональным величине μ_k [9]. На основании этого можно сделать вывод, что k -я координата вектора y является слабо наблюдаемой, если $\mu_k \ll 1$ и хорошо наблюдаемой в противном случае.

Далее, учитывая взаимосвязь $y = U \cdot x$, можно судить о степени наблюдаемости координат вектора x .

Стохастическая мера наблюдаемости. Данная мера также введена Н. А. Парусниковым и его соавторами [8]. Мера задается так:

$$\mu_i = 1 - \sqrt{\frac{p_i^+}{p_i^-}}, \quad (4)$$

где μ_i – мера наблюдаемости i -й координаты вектора состояния системы, p_i^+ и p_i^- – соответственно апостериорная и априорная дисперсии оценки i -й координаты.

В случае использования для оценивания ФК, данные дисперсии представляют диагональные элементы соответственно апостериорной и априорной корреляционных матриц ошибок. Хорошо наблюдаемым координатам вектора состояния системы соответствуют значения данной меры близкие к 1, плохо наблюдаемым – значения близкие к 0.

Мера наблюдаемости, ориентированная на реализацию процесса оценки состояния системы с помощью метода наименьших квадратов (МНК). Данная количественная характеристика наблюдаемости рассмотрена Д. В. Лебедевым и А. И. Ткаченко [1].

Система нормальных уравнений МНК относительно координат вектора текущего состояния системы (1), (2) имеет вид:

$$y(t_j) = B(t_j) \cdot x(t_j), \quad (5)$$

где $t_j = j \cdot \Delta t$ ($j = 0, 1, 2, \dots$) – дискретное время, $B(t_j)$ – симметрическая матрица размера $n \times n$, $y(t_j) \in R^n$.

Формирование системы (5) включает этап прогноза

$$B(t_{j+1}) = F^T(t_j, t_{j+1}) \cdot B(t_j) \cdot F(t_j, t_{j+1}),$$

$$y(t_{j+1}) = F^T(t_j, t_{j+1}) \cdot y(t_j),$$

$$x(t_{j+1}) = B^{-1}(t_{j+1}) \cdot y(t_{j+1}),$$

и этап обработки измерений:

$$B^+ = B^- + H^T \cdot W^2 \cdot H, \quad y^+ = y^- + H^T \cdot W \cdot z.$$

Здесь $F(t, t_j)$ – фундаментальная матрица решений системы (1), (2), W – некоторая невырожденная весовая матрица [1], верхние индексы “–” и “+”

обозначают значения B и y соответственно до и после обработки очередного измерения.

Матрицу $B(t_j)$ можно представить в виде

$$B(t_j) = \sum_{k=1}^n \lambda_k \cdot u_k \cdot u_k^T, \quad (6)$$

где $\lambda_k > 0$ ($k = \overline{1, n}$) – собственные значения матрицы $B(t_j)$, $u_k = [u_{k1}, u_{k2}, \dots, u_{kn}]^T$ – соответствующие им ортонормированные собственные векторы этой матрицы.

Взаимосвязь ошибки оценивания вектора x – δx и ошибки формирования вектора y – δy , вызванной погрешностями измерений в момент времени t_j в первом приближении можно представить

$$B(t_j) \cdot (x + \delta x) = y(t_j) + \delta y. \quad (7)$$

На основании (6) и (7) можно записать:

$$x(t_j) = \sum_{k=1}^n \lambda_k^{-1} \cdot u_k \cdot u_k^T \cdot y(t_j), \quad \delta x(t_j) = \sum_{k=1}^n \lambda_k^{-1} \cdot u_k \cdot u_k^T \cdot \delta y. \quad (8)$$

Из (8) видно, что координата x_j вектора x , удовлетворяющего уравнению (5), плохо оцениваема в том и только в том случае, если найдется такое i ($1 \leq i \leq n$), что $\lambda_i^{-1} \cdot |u_{ij}| \gg 1$. Таким образом, в качестве меры наблюдаемости j -й координаты вектора x системы (1), (2) можно использовать следующую величину:

$$\mu_j = \max_i (\lambda_i^{-1} \cdot |u_{ij}|), \quad i = \overline{1, n}. \quad (9)$$

Если $\mu_j \gg 1$, то координата x_j плохо наблюдаема, иначе – хорошо наблюдаема.

В данной статье предлагаются две новые количественные характеристики наблюдаемости. Рассмотрим их, полагая систему (1), (2) нестационарной. В начале рассмотрим случай, когда размерность n вектора состояния x и размерность m вектора измерения z совпадают, т.е. $m = n$. В этом случае если матрица измерения $H(t)$ в некоторый момент времени t является невырожденной, то из (2) однозначно находится вектор состояния:

$$x = H^{-1}(t) \cdot z.$$

На практике, как правило, имеют место случаи, когда $m < n$, т.е. в некоторый момент времени t нельзя однозначно определить вектор x из-за недостатка данных. В этих условиях естественно расширить используемую информацию за счет измерений более чем в один момент времени, что аналогично построению следующей системы уравнений:

$$z = \Pi_0 \cdot x, \quad \dot{z} = (\Pi_0 \cdot A + \dot{\Pi}_0) \cdot x, \quad \dots, \quad z^{(n-1)} = (\Pi_{n-2} \cdot A + \dot{\Pi}_{n-2}) \cdot x. \quad (10)$$

Здесь $\Pi_k = \Pi_{k-1} \cdot A(t) + \dot{\Pi}_{k-1}$, $k = \overline{1, n-1}$.

Система (10) составлена из $m \cdot n$ -уравнений относительно n неизвестных координат вектора x . Ее обобщенное решение [10]:

$$x = M^+ \cdot z', \quad (11)$$

где $z' = \begin{pmatrix} z^T & \dot{z}^T & \dots & (z^{(n-1)})^T \end{pmatrix}^T$, $M = \begin{bmatrix} \Pi_0^T & \Pi_1^T & \dots & \Pi_{n-1}^T \end{bmatrix}^T$, M^+ – псевдообратная матрица для матрицы M :

$$M^+ = (M^T \cdot M)^{-1} \cdot M^T. \quad (12)$$

Поскольку

$$(M^T \cdot M)^{-1} = \frac{\left[(M^T \cdot M)^* \right]^T}{\det(M^T \cdot M)}, \quad (13)$$

где символ “*” – означает вычисление присоединенной матрицы, то для ошибки определения вектора x можно записать:

$$\delta x = M^+ \cdot \delta z' = \frac{\left[(M^T \cdot M)^* \right]^T \cdot M^T}{\det(M^T \cdot M)} \cdot \delta z'. \quad (14)$$

Здесь δx – ошибка определения вектора x ; $\delta z'$ – ошибка формирования вектора z' , связанная с погрешностями измерений.

Таким образом, если $\det(M^T \cdot M) \ll 1$, то малая ошибка $\delta z'$ приведет к большой ошибке оценивания какой-то из координат вектора состояния x . В этом случае можно говорить о слабой наблюдаемости такой координаты [1].

Параметр

$$\mu = \det(M^T \cdot M) \quad (15)$$

можно использовать как количественную характеристику наблюдаемости.

Значение $\mu \ll 1$ говорит о наличии слабо наблюдаемых координат вектора состояния, в противном случае все координаты вектора x являются

хорошо наблюдаемыми. В дальнейшем будем называть данную меру *обобщенной*, т.к. она в целом характеризует наблюдаемость системы.

Кроме определения признака наличия слабо наблюдаемых координат, на практике важно выяснить, какие именно координаты вектора состояния являются слабо наблюдаемыми.

На основании (14) ошибку определения i -й координаты вектора x можно представить

$$\delta x_i = m_{i,1}^+ \cdot \delta z'_1 + m_{i,2}^+ \cdot \delta z'_2 + \dots + m_{i,m \cdot n}^+ \cdot \delta z'_{m \cdot n} = \sum_{j=1}^{m \cdot n} m_{i,j}^+ \cdot \delta z'_j, \quad (16)$$

где $m_{i,j}^+$ – элемент матрицы M^+ , стоящий на пересечении ее i -й строки и j -го столбца; $\delta z'_j$ – j -й элемент вектора $\delta z'$.

Из приведенного соотношения следует, что для хорошей наблюдаемости координаты x_i достаточно, чтобы все элементы i -й строки матрицы M^+ имели абсолютные значения ≤ 1 . Если для некоторого элемента $m_{i,j}^+$ ($1 \leq j \leq m \cdot n$) данной матрицы выполняется соотношение $|m_{i,j}^+| \gg 1$, то малая ошибка $\delta z'_j$ может привести к большой ошибке оценки i -й координаты вектора состояния x . В этом случае координату x_i можно считать слабо наблюдаемой.

На основании вышесказанного в качестве количественной характеристики наблюдаемости i -й координаты вектора x введем следующую меру:

$$\mu_i = \max_j (|m_{i,j}^+|), \quad j = \overline{1, m \cdot n}. \quad (17)$$

Если $\mu_i \gg 1$, значит координата x_i является слабо наблюдаемой, в противном случае – хорошо наблюдаемой.

Естественно, меры наблюдаемости (15) и (17) применимы и для исследования стационарных систем. Таким образом, в дополнение к существующим, предложены две новые меры наблюдаемости, которые отличает наглядность и вычислительная простота.

Следует отметить, что критичный порядок значений для мер наблюдаемости задаваемых соотношениями (3), (4), (9), а также введенными в данной работе (15) и (17) определяется условиями конкретной задачи.

Рассмотрим использование введенных количественных характеристик наблюдаемости на примере исследования упрощенной модели ошибок автономной навигации в горизонтальной плоскости, построенной для объекта, движущегося с малыми углами тангажа и крена (см. рис. 1).

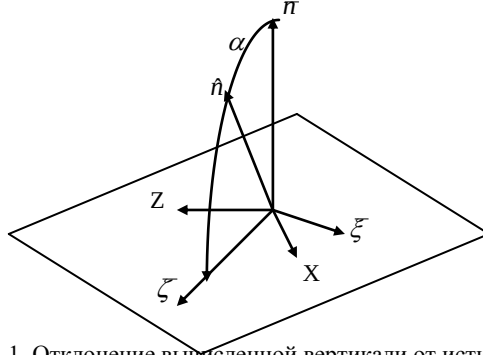


Рис. 1. Отклонение вычисленной вертикали от истинной

Пусть α – малый угол отклонения вычисленной вертикали $\hat{n}$ от истинной π . В этом случае показания акселерометров (АК), алгоритмически приведенные к горизонтальной плоскости, содержат «ошибочное» ускорение

$$\delta v = -g \cdot \alpha + \delta \alpha. \quad (18)$$

Здесь g – значение ускорения силы тяжести; $\delta \alpha = \text{Pr}_{\xi}(\delta \alpha_x + \delta \alpha_z)$ – проекция вектора суммарной ошибки измерений x -го и z -го АК на ось $\xi = (\pi \times \hat{n}) \times \pi$.

При этом «уход» вычисляемой с помощью навигационной системы вертикали, обусловленный интегрированием ускорения (18) и ошибками гироскопов (ГС), подчиняется закону

$$\dot{\alpha} = \frac{\delta v}{R} + \delta \omega, \quad (19)$$

где R – радиус земного сфероида; $\delta \omega = \text{Pr}_{\xi}(\delta \omega_x + \delta \omega_z)$ – проекция вектора суммарной ошибки измерений x -го и z -го ГС на ось $\xi = \pi \times \hat{n}$.

Матрица динамики и вектор состояния системы, составленные на базе уравнений (18), (19), следующие:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & -g & 0 & 1 \\ \frac{1}{R} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad x = (\delta v \quad \alpha \quad \delta \omega \quad \delta \alpha)^T. \quad (20)$$

Ошибки $\delta \omega$ и $\delta \alpha$ будем считать константами, т.е. $\delta \omega = 0$, $\delta \alpha = 0$. Считаем, что непосредственно измеряется только ошибка по скорости, т.е.

$$H = [1 \ 0 \ 0 \ 0]. \quad (21)$$

Система, задаваемая (20), (21) является стационарной, порядка $n = 4$. На основании критерия наблюдаемости Калмана, система является не вполне наблюдаемой, т.к. $\text{rank } M = 3 < n = 4$, где M – матрица наблюдаемости, составленная на базе (20), (21).

Для определения ненаблюдаемой ошибки, исключим из (20), (21) по очереди ошибку $\delta\alpha$, а затем $\delta\omega$, в результате получим системы:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & -g & 0 \\ \frac{1}{R} & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad x = (\delta v \ \alpha \ \delta\omega)^T, \quad (22)$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & -g & 1 \\ \frac{1}{R} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad x = (\delta v \ \alpha \ \delta\alpha)^T, \quad (23)$$

$$H = [1 \ 0 \ 0]. \quad (24)$$

На основании критерия наблюдаемости Калмана, система (22), (24) является вполне наблюдаемой, а система (23), (24) – не вполне наблюдаемой.

Предположим теперь, что измерения ошибки скорости ВЛА недоступны, однако возможно измерить угол отклонения вертикали α . В этом случае:

$$H = [0 \ 1 \ 0]. \quad (25)$$

Теперь, на основании критерия наблюдаемости Калмана, система (22), (25) является не вполне наблюдаемой, а система (23), (25) вполне наблюдаема.

Таким образом, в рамках принятой модели ошибок, для наблюдаемости ошибки ГС $\delta\omega$ достаточно измерения ошибки δv , а для наблюдаемости ошибки АК $\delta\alpha$ – измерения угла α . В дальнейшем систему (22), (24) будем называть “система с ГС”, а систему (23), (25) – “система с АК”.

Определим теперь количественные характеристики наблюдаемости для системы с ГС и системы с АК на основе введенных в данной статье мер.

Для системы с ГС значение меры (15) $\mu = g^4 \cong 10^4 \gg 1$. Значения меры (17) для скоростной ошибки $\mu_{\delta v} = 1$, для угла отклонения вертикали $\mu_{\alpha} \approx 0.1$ и для ошибки измерения ГС $\mu_{\delta\omega} \approx 0.1$. Следовательно, все координаты вектора состояния данной системы являются хорошо наблюдаемыми.

Для системы с АК значение меры наблюдаемости (15) $\mu = 1/R^4 \cong 6 \cdot 10^{-28}$ ($R = 6378137.0$ м [10]). Такое малое значение меры говорит о наличии слабо наблюдаемых координат. Определим слабо наблюдаемые координаты с помощью меры (17). Так как $\mu_{\delta v} \approx 6.4 \cdot 10^6 \gg 1$, $\mu_{\alpha} = 1$ и $\mu_{\delta \alpha} \approx 6.4 \cdot 10^6 \gg 1$, то ошибка δv и ошибка АК являются слабо наблюдаемыми.

Для проверки корректности сделанных заключений, для ошибок $\delta \omega$ и $\delta \alpha$ соответственно были синтезированы два наблюдающих устройства идентификации на основе уравнения [2] $\dot{x} = (A - K \cdot H) \cdot x + K \cdot z$, где K – матрица-столбец коэффициентов усиления (КУ).

Известно [2], что при синтезе наблюдающего устройства возможно задание качества переходного процесса. В данном случае наблюдающие устройства синтезировались, чтобы относительная ошибка оценивания после 10 с функционирования была меньше 1%.

Значения матрицы K для систем с ГС и с АК получились соответственно следующими: $(3 \ -0.3 \ -0.1)^T$ и $(1.9 \cdot 10^7 \ 3 \ 6.4 \cdot 10^7)^T$. Большие во втором случае значения КУ приводят к усилению ошибок измерения и являются следствием слабой наблюдаемости ошибок δv и $\delta \alpha$. Данный вывод полностью согласуется с полученным выше результатом.

Сравним введенные новые меры наблюдаемости с известными [1, 8, 9]. В качестве критерия сравнения примем согласованность выводов о наблюдаемости координат векторов состояния системы с ГС и системы с АК.

Значения *детерминированной* меры и меры ориентированной на использование *метода наименьших квадратов* вычисленные для системы с ГС представлены в табл. 1, а для системы с АК – в табл. 2.

Таблица 1

Значения мер наблюдаемости, система с ГС

Мера	$\mu_{\delta v}$	μ_{α}	$\mu_{\delta \omega}$
Детерминированная мера	1	9.8	1
Мера, ориентированная на МНК	0.56	0.023	0.04

Таблица 2

Значения мер наблюдаемости, система с АК

Мера	$\mu_{\delta v}$	μ_{α}	$\mu_{\delta \alpha}$
Детерминированная мера	$1.6 \cdot 10^{-7}$	1	1
Мера, ориентированная на МНК	$5 \cdot 10^{13}$	$1.4 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^{12}$

Для *стохастической* меры приведем графики зависимостей от времени значений мер для координат векторов состояния рассматриваемых систем (представлены на рис. 2, рис. 3). Данные значения вычислены согласно (4) на основе данных моделирования работы ФК, построенных соответственно для системы с ГС (см. рис. 2) и системы с АК (см. рис. 3).

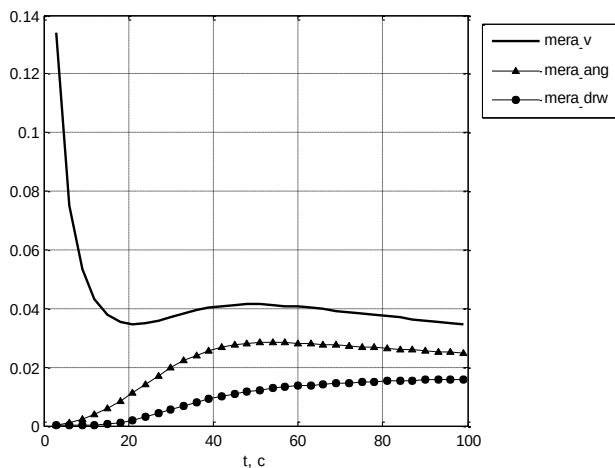


Рис. 2. Стохастическая мера наблюдаемости, система с ГС

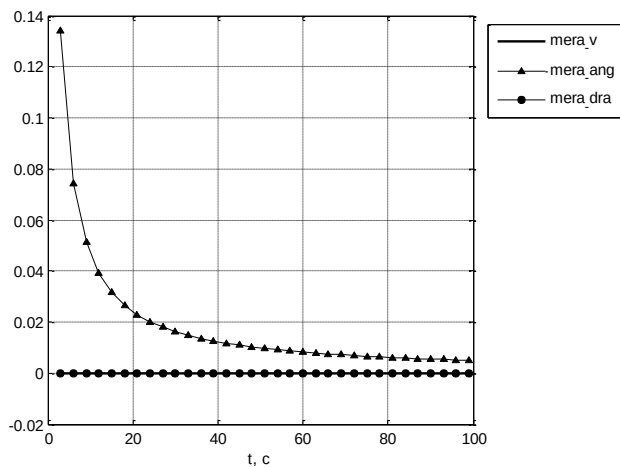


Рис. 3. Стохастическая мера наблюдаемости, система с АК

На приведенных рисунках приняты следующие обозначения для мер наблюдаемости: mera_v – для δv , mera_ang – для α , mera_drw – для $\delta \omega$ и mera_dra – для δa .

На основе представленных результатов делаем вывод, что в системе с ГС все координаты вектора состояния системы хорошо наблюдаются, а в системе с АК хорошо наблюдается угол отклонения вертикали α , остальные координаты – являются плохо наблюдаемыми. Это полностью соответствует выводам сделанным на базе мер (15) и (17).

Выводы. Относительно введенных мер наблюдаемости можно отметить следующее.

- Результаты их применения к анализу наблюдаемости ошибок инерциальной навигации хорошо согласуются с результатами, полученными на основе использования известных мер.
- По сравнению с мерами (4) и (9) введенные характеристики обладают тем преимуществом, что позволяют без синтеза оценивающего устройства предварительно оценить наблюдаемость и эффективность оценивания координат вектора состояния системы.
- Введенные аналитические меры (15) и (17) позволяют получить более полную информацию о наблюдаемости системы, по сравнению с критерием Калмана. С их помощью, можно определить соотношения и диапазоны значений параметров системы, для которых система будет “хорошо” наблюдаема, “слабо” наблюдаема или не полностью наблюдаема.

Список литературы: 1. Лебедев Д. В., Ткаченко А. И. Информационно-алгоритмические аспекты управления подвижными объектами.– Киев: Наук. думка, 2000.– 310 с. 2. Кузовков Н. Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. М., «Машиностроение», 1976, 184 с. 3. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского.–М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987.– 712 с. 4. Организация взаимодействия спутниковых и автономных навигационных средств морских объектов / В. И. Резниченко, В. И. Лапшина / Под редакцией доктора технических наук В. И. Резниченко.– СПб., 2004.– 88 с. 5. Костров А. В. Наблюдаемость и управляемость гироскопических устройств.– Л.: ЦНИИ “РУМБ”, 1980. 6. Костенко Ю. Т., Любчик Л. М. Системы управления с динамическими моделями.– Х.: Основа, 1996.– 211 с. 7. Кортунов В. И., Проскура Г. А. Наблюдаемость и обнаруживаемость инструментальных ошибок БИНС // Авиационно-космическая техника и технология.– 2006– № 3 (29).– С. 31-38. 8. Парусников Н. А. и др. О стохастической мере оцениваемости // Коррекция в навигационных системах и системах ориентации искусственных спутников Земли.– Изд-во МГУ, 1986.– С. 4-9. 9. Парусников Н. А., Морозов В. М., Борзов В. И. Задача коррекции в инерциальной навигации.– М.: Изд-во Моск. ун-та, 1982.– 176 с. 10. Воеводин В. В., Кузнецов Ю. А. Матрицы и вычисления.– М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984.– 320 с. 11. Бромберг П. В. Теория инерциальных систем навигации.– М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979.–296 с.

Поступила в редколлегию 20.03.09

Е. А. ЮХНО, студентка НТУ «ХПИ»

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫМ РЕЖИМОМ ТЕРМОЦИКЛЕРА

Запропоновано математичну модель термоциклера на основі диференціальних рівнянь балансу теплоти й внутрішньої енергії, а також законів теплопередачі. На її основі виконано синтез системи управління, оптимальної по інтегральному квадратичному критерію якості.

Предложена математическая модель термоциклера на основе дифференциальных уравнений баланса теплоты и внутренней энергии, а также законов теплопередачи. На ее основе проведен синтез системы управления, оптимальной по интегральному квадратичному критерию качества.

There were offered the mathematical model of thermocycler on the basis of differential equations of heat balance and internal energy and heat transfer laws. On its basis synthesis of a control system, optimum by integrated square-law criterion of quality is spent.

При проведении микробиологических научных исследований широкое применение получили термоциклеры (ТЦ) – устройства, поддерживающие в термокамере заданный закон изменения температуры с требуемой точностью[1]. Особенностью ТЦ является необходимость как подвода, так и отвода теплоты от рабочей камеры в течении цикла. Одним из путей организации таких режимов, является использование в качестве источника тепла (холода) элементов Пельтье (ЭП)[2], позволяющих, простым изменением направления электрического тока через ЭП, эффективно (практически безынерционно) изменять направление теплового потока между ЭП и рабочей камерой.

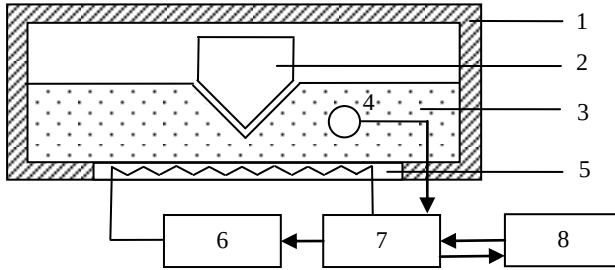
Применение ЭП в качестве источника теплоты для ТЦ ставит ряд новых задач перед системой автоматического управления ТЦ, направленных на повышение точности поддержания заданной программы изменения температуры с одной стороны и на возможность реализации любого наперед заданного закона, из некоторого класса программ изменения температуры, с другой стороны. Реализация таких задач возможна только с применением современных методов теории автоматического управления, а также средств вычислительной техники и соответствующих информационных технологий.

Типичная схема ТЦ показана на рис.1. Управляемый источник тепла (холода) ЭП 5 находится в тепловом контакте с алюминиевой пластиной 3 (нагреватель), которая в свою очередь нагревает или охлаждает объект 2. Направление и величина теплового потока регулируются блоком управления 7. Алгоритм управления задается внешним устройством 8.

Для описания взаимодействия между элементами ТЦ воспользуемся основными законами аккумуляции тепловой энергии и теплопередачи:

$$mc \frac{dT}{dt} = \sum_{k=1}^n q_k, \quad (1)$$

где m , c , T – масса, теплоемкость, и температура рассматриваемого элемента, q_k – тепловой поток k -го элемента системы.



1 – корпус; 2 – объект; 3 – нагреватель; 4 – датчик температуры; 5 – элемент Пельтье;
6 – источник питания; 7 – блок управления; 8 – внешнее устройство (ПЭВМ)

Рис. 1. Термоциклер

В свою очередь q_k определяется на основании закона Фурье

$$q_k = \alpha \cdot F(T_k - T), \quad (2)$$

где α – коэффициент теплопередачи, F – поверхность теплообмена, T_k – температура k -го элемента.

Таким образом, математическая модель термоциклера в пространстве состояний может быть представлена в виде системы линейных дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu, \\ y &= Cx, \end{aligned} \quad (3)$$

где $x = (T_1 \ T_2 \ T_3)^T$ – вектор температур нагревателя, объекта и воздуха соответственно; u – управляющее воздействие (мощность ЭП); $y = T_1$ – выход-

ная переменная; $A = \begin{pmatrix} \frac{\alpha_1 F_1 + \alpha_2 F_2}{m_1 c_1} & -\frac{\alpha_1 F_1}{m_1 c_1} & -\frac{\alpha_2 F_2}{m_1 c_1} \\ \frac{\alpha_1 F_1}{\alpha_1 F_1 + \alpha_3 F_3} & -\frac{\alpha_1 F_1 + \alpha_3 F_3}{m_2 c_2} & \frac{\alpha_3 F_3}{m_2 c_2} \\ \frac{\alpha_2 F_2}{m_3 c_3} & \frac{\alpha_3 F_3}{m_3 c_3} & -\frac{\alpha_2 F_2 + \alpha_3 F_3}{m_3 c_3} \end{pmatrix}$ – матрица

динамики системы; $B = \begin{pmatrix} \frac{1}{m_1 c_1} & 0 & 0 \end{pmatrix}^T$ – матрица управления; $C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$

– матрица выхода. В системе (3) были применены следующие обозначения: $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – коэффициенты теплопередачи; F_1, F_2, F_3 – площади поверхностей теплопередачи; m_1, m_2, m_3 – массы и c_1, c_2, c_3 – теплоемкости нагревателя, объекта и воздуха соответственно.

Синтез регулятора, обеспечивающего требуемое качество выполнения заданной программы изменения выходных координат объекта, будем проводить в два этапа. На первом этапе синтезируется оптимальный регулятор нулевого состояния системы (3) путем решения линейно-квадратичной задачи оптимального управления. Как известно [3], коэффициенты усиления такого регулятора зависят от матриц весовых коэффициентов Q и R интегрального квадратичного функционала

$$I = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt. \quad (4)$$

Матричный коэффициент усиления регулятора K определяется в виде $K = -R^{-1} B^T P$, где P представляет собой определенно-положительное решение алгебраического уравнения Риккати

$$PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q = 0, \quad (5)$$

а закон управления имеет вид

$$u = Kx. \quad (6)$$

Как видно из приведенного рассмотрения линейно-квадратичной задачи она ориентирована на решение задачи стабилизации нулевого положения равновесия. В то же время реальные постановки задач автоматического управления ориентированы как на стабилизацию ненулевых положений равновесия, так и на отслеживание некоторых наперед заданных программных траекторий в пространстве выходных координат. Последний случай имеет место в системе управления ТЦ. Пусть $y = y_0 \neq 0$ требуемое установившееся значение вектора выходных координат. Этому значению соответствует некоторое управление u_0 и вектор состояния x_0 . Поскольку y_0, u_0 и x_0 соответствуют некоторому положению равновесия системы (3), то они должны удовлетворять системе линейных алгебраических уравнений

$$\begin{aligned} Ax_0 + Bu_0 &= 0, \\ Cx_0 &= y_0. \end{aligned} \quad (7)$$

Система (7) в принципе позволяет определить искомые вектора x_0 и u_0 за исключением случая, когда матрица A вырождена. Если положение равновесия (u_0, x_0, y_0) идентифицировано, то процедура синтеза регулятора для системы в отклонениях ничем не отличается от рассмотренного выше синтеза регулятора нулевого состояния.

Рассмотрим другой подход к решению данной задачи, основанный на нахождении постоянной поправки к закону управления (6) для замкнутой системы управления, которая является устойчивой, а следовательно, матрица динамики которой невырождена. Будем искать управление в виде

$$u = Kx + \Delta u, \quad (8)$$

где Δu – постоянный вектор поправок, обеспечивающий требуемое значение вектора выходных координат.

Подставляя (8) в систему дифференциальных уравнений (3), получим

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \bar{A}x + B\Delta u, \\ y &= Cx, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\bar{A} = (A + BK)$ – матрица устойчивой линейной динамической системы, оптимальной по квадратичному интегральному критерию (4).

Поскольку Δu предполагается постоянной, то равновесные значения x_0 , и y_0 связаны с Δu системой алгебраических уравнений

$$\begin{aligned} \bar{A}x_0 + B\Delta u &= 0, \\ Cx_0 &= y_0. \end{aligned} \quad (10)$$

Система (10) аналогична системе (7) с той разницей, что ее матрица всегда невырождена. Решение (10) в случае равенства размерностей векторов входа и выхода имеет вид

$$\Delta u = -(C\bar{A}^{-1}B)^{-1}y_0. \quad (11)$$

Таким образом, закон управления, обеспечивающий стабилизацию ненулевого значения выходных координат y_0 имеет вид

$$u = Kx + Dy_0, \quad (12)$$

где $D = -(C\bar{A}^{-1}B)^{-1}$ – матрица преобразования выходного вектора в соответствующий опорный управляющий вектор Δu .

Учтем теперь, что закон управления (12) для своей реализации требует знания всех компонент вектора состояния x . Для его оценки $\hat{x}$ можно воспользоваться динамическим наблюдателем [3], имеющим следующий вид:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - C\hat{x}), \quad (13)$$

где L – матрица, выбираемая из условий требуемого расположения корней характеристического уравнения матрицы динамики наблюдателя $(A - LC)$.

Таким образом, окончательно, структура оптимального регулятора ненулевого вектора выхода может быть представлена в виде рис.2.

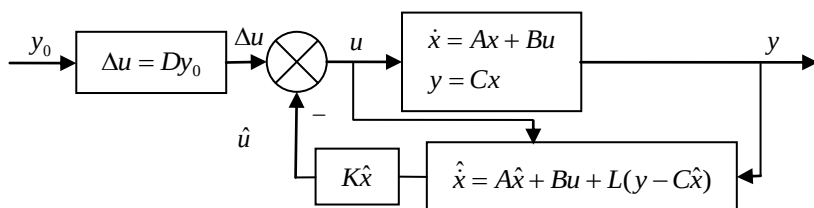


Рис. 2. Структурная схема оптимального регулятора ненулевого выходного вектора

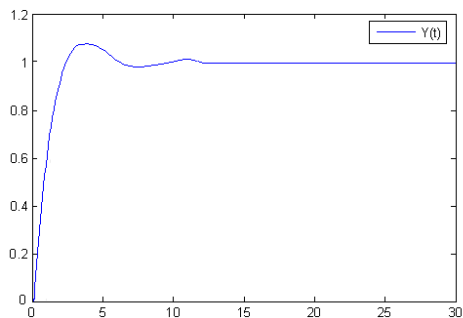


Рис. 3. Оптимальный переходной процесс ТЦ

На рис.3 приведен график оптимального переходного процесса термоциклера, полученный в результате численного моделирования системы, структурная схема которой представлена на рис.2.

Список литературы: 1. И. Чермак, В. Петерка, И. Заворка Динамика регулируемых систем в теплоэнергетике и химии – М.: Мир, 1972, – 624 с. 2. И.Д. Жук Эффект Пельтье и его применение – Вестник Сибирской аэрокосмической академии имени академика М. Ф. Решетнева : сб. науч. тр. / САА. Вып. 8. Красноярск, 2006. с. 46 – 48. 3. Х. Квакернаак, Р. Сиван Линейные оптимальные системы управления – М.: Мир, 1977, – 658 с.

Поступила в редколлегию 19.03.09

А. І. КУПІН, канд. техн. наук, доцент, Криворізький технічний університет (м. Кривий Ріг)

ІЄРАРХІЧНА МОДЕЛЬ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТА УПРАВЛЯЮЧИХ ПОТОКІВ В УМОВАХ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЛІНІЇ МАГНІТОЗБАГАЧУВАЛЬНОЇ ФАБРИКИ ГЗК

Зроблено системний аналіз інформаційних і керуючих потоків в умовах залізрудного комбінату. Отримано модель рівнів ієрархії інтелектуальної системи керування ТП.

Сделан системный анализ информационных и управляющих потоков в условиях железорудного комбината. Получена модель уровней иерархии интеллектуальной системы управления ТП.

The system analysis information and control flows are made in condition iron-ore complex. There are received models of levels of hierarchy of intellectual system control of TP.

Вступ, проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Сталий розвиток вітчизняної гірничо-металургійної галузі промисловості та її конкурентноздатність в умовах світового ринку на сучасному етапі розвитку безпосередньо залежить від рівня застосування засобів комплексної автоматизації. При чому, загальною тенденцією є постійне ускладнення автоматизованих систем управління за рахунок застосування перспективних технологій штучного інтелекту (нейронні мережі, нечітка логіка, еволюційні алгоритми тощо). Тому у контексті проблеми реалізації інтелектуального управління в умовах технологічного процесу (ТП) збагачення магнетитових кварцитів в умовах рудозбагачувальної фабрики (РЗФ) гірничо-збагачувального комбінату (ГЗК) розглядається питання первинного аналізу системних зв'язків такого об'єкту. Актуальність такого завдання обґрунтовано в [1].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Для оцінювання ієрархічної структури керування та аналізу залежностей потенційних інформаційних та управляючих потоків і зв'язків в умовах складних технологічних об'єктів зазвичай застосовується алгоритм структурної q-зв'язності, що є однією з найбільш поширених та достатньо добре досліджених якісних характеристик систем [2-5]. Разом з цим застосування подібного підходу в умовах підприємств збагачувальної технології фактично обмежено роботами автора [5] (для вугільної галузі).

Постановка завдання. З метою реалізації інтелектуального управління ТП збагачення [1] проведемо симпліціальний аналіз інформаційних та управляючих потоків в умовах РЗФ ГЗК. При цьому також необхідно обґрунтувати кількість рівнів ієрархії для інтелектуальної системи управління (ІСУ) у відповідності існуючим міжнародним стандартам з проектування

подібних систем. У якості типового об'єкту інформатизації будемо розглядати технологічну лінії (секцію) РЗФ.

Викладення матеріалу та результати. Для спрощення системного дослідження та виявлення спільності завдань керування окремими стадіями збагачення візьмемо за основу типову технологічну схему ланцюга апаратів секції РЗФ [6] та застосуємо методологію декомпозиції. Спрощена структурна схема технологічної лінії типової РЗФ магнітного збагаченням залізної руди надано на рис. 1 [6].

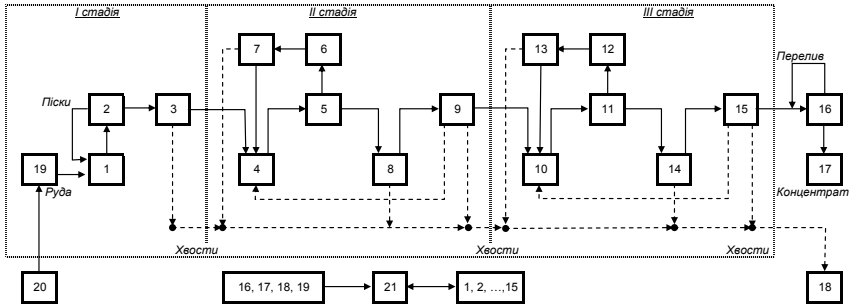


Рис. 1. Спрощена структура технологічної лінії (секції) РЗФ

Блоки мають такі позначення: 1 – шаровий млин (або млини) першої стадії; 2 – спіральний класифікатор; 3, 7, 9, 13, 15 – магнітні сепаратори; 4, 10 – зумпи; 5, 11 – гідроциклони; 6, 12 – млини 2-ї та третьої стадії (МШЦ, ММС тощо); 8, 14 – дешламатори; 16 – вакуум-фільтр; 17 – склад концентрату; 18 – хвостосховище; 19 – рудний бункер; 20 – завантажувальний пристрій для руди (автостела); 21 – блок контролю та керування ТП.

Отже, згідно [2-3], результуючу матрицю інцидентності $\Lambda = \|\lambda_{ij}\|$ (де $i, j = 1, \dots, 15$ – номери блоків; $\lambda_{ij} = 1$, якщо i -й блок є початком ребра, закінченням якого є блок j ; $\lambda_{ij} = 0$, якщо $i = j$ або i -й блок не є початком ребра, закінченням котрого є блок j ; номери строк відповідають позначенню симплексів) для даного випадку в аналітичному вигляді представлено на рис. 2.

Структурна збитковість матриці оцінюється на основі показника R_K [3]

$$R_K = \left[\sum_{i=1}^{21} \sum_{j=1}^{21} \lambda_{ij} \right] \frac{1}{20} - 1 = \frac{65}{20} - 1 \approx 2,25.$$

Оскільки $R_K = 2,25 > 0$, то система є зв'язною (без обривів) та має збитковість (тобто потенційно надійна).

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Рис. 2. Матриця інцидентності Λ

Виконуючі q -аналіз матриці Λ , шляхом сумування рядків та послідовного групування, отримуємо такі класи еквівалентності: Q_{q_c} (Q_{q_c} – кількість симплексів розмірності $q_c=0, \dots, 14$; {у фігурних дужках} позначаються номери q -зв'язних симплексів):

$$\begin{aligned} Q_{14} &= 1: \{21\}; Q_{13} = 1: \{21\}; Q_{12} = 1: \{21\}; Q_{11} = 1: \{21\}; \\ Q_{10} &= 1: \{21\}; Q_9 = 1: \{21\}; Q_8 = 1: \{21\}; Q_7 = 1: \{21\}; \\ Q_5 &= 1: \{21\}; Q_5 = 1: \{21\}; Q_4 = 1: \{21\}; Q_3 = 3: \{9\}, \{15\}, \{21\}; \\ Q_2 &= 10: \{2\}, \{3\}, \{5\}, \{7\}, \{8\}, \{11\}, \{13\}, \{14\}, \{16\}, \{9, 15, 21\}; \\ Q_1 &= 7: \{1\}, \{4\}, \{6\}, \{10\}, \{12\}, \{19\}, \{2, 3, 5, 7-9, 11, 13-16, 21\}; \\ Q_0 &= 4: \{17\}, \{18\}, \{20\}, \{\text{решта вузлів, без виключення}\}. \end{aligned}$$

Структурний вектор комплексу має такий вигляд:

$$Q_K = (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 3, 10, 7, 4)$$

Аналіз вектору Q_K показує, що він зв'язаний для великих (9,...,14), середніх (4,5,6) та малих (0) значень q_c . Зокрема, при $q_c = 0, 1, 2, 3$ комплекс розпадається на кілька незв'язних компонентів, що інтерпретується як присутність двох геометричних перешкод у системі [1] або трьох рівнів q -зв'язних симплексів.

Ієрархічна організація типової структури управління технологічною лінією магнітного збагачення залізної руди в умовах РЗФ (рис. 1) також підтверджується однотипними функціональними характеристиками значеннями максимальної розмірності симплексів (де у фігурних дужках зазначається номер симплексу і потім у круглих – множина блоків, що входять до нього; $\emptyset$ – пуста множина), які згруповано таким чином:

$$\begin{aligned} q_c = -1 &: \{\emptyset(\emptyset)\}; \\ q_c = 0 &: \{17,(21)\}, \{18,(21)\}, \{20,(19)\}; \\ q_c = 1 &: \{1,(2,21)\}, \{4,(5,21)\}, \{6,(7,21)\}, \\ &\quad \{10,(11,21)\}, \{12,(13,21)\}, \{19,(1,21)\}, \\ q_c = 2 &: \{2,(1,3,21)\}, \{3,(4,18,21)\}, \{5,(6,8,21)\}, \\ &\quad \{7,(4,18,21)\}, \{8,(9,18,21)\}, \{11,(12,14,21)\}, \\ &\quad \{13,(10,18,21)\}, \{14,(15,18,21)\}, \{16,(16,17,21)\}; \\ q_c = 3 &: \{9,(4,10,18,21)\}, \{15,(10,16,18,21)\}; \\ q_c = 14 &: \{21,(1,2,\dots,15)\}. \end{aligned}$$

Аналіз груп малих значень q_c (-1, 0) показує, що їх зміст можливо трактувати як симплекси, що характеризують вихідні та вхідні продукти переробки (наприклад, блоки: 17 – вміст корисного в концентраті, вихід, вилучення та продуктивність секції; 18 – втрати заліза в концентраті, 20 – кількість мінеральних різновидів у вихідній шихті, первинний вміст заліза, необхідні фізико-хімічні, морфологічні та технологічні властивості руди, гранулометричний склад. Також мале значення $q_c = 1$ – відбиває режимні і керовані параметри роботи агрегатів подрібнення (млинів) та окремого допоміжного устаткування – зумпфів, бункерів (наприклад, для млинів різних стадій подрібнення це блоки: 1, 6, 12: витрати руди та води, швидкість обертання барабану, ступінь завантаження шарами, рудою чи рудною галькою при самоподрібненні, циркуляційне навантаження, вихід та продуктивність за готовим класом; 4, 10 – рівень пульпи у зумпфах; 19 – ступінь завантаження рудного бункеру). Для груп середніх значень q_c (2, 3) – симплекси, що містять режимні параметри ТП класифікації, дешламації та магнітної сепарації та відповідні впливи керування (наприклад, блоки: 2 – кут нахилу ванни класифікатора, щільність пульпи в процесі класифікації та на

зливів, вміст або вихід готового чи заданого класу, висота порогу зливу, витрати води, продуктивність за промпродуктом та пісками для спірального класифікатора; 5, 11 – діаметри живильного та зливного патрубків чи піскової насадки тиск пульпи на вході, витрати води, продуктивність, вихід готового чи заданого класу для гідроциклонів; 3, 7, 9, 13, 15 – напруженість магнітного поля, швидкість обертання барабану, щільність пульпи, відстань між барабаном та ванною, продуктивність та якість за промпродуктом чи концентратом на виході, втрати корисного у хвостах, вилучення заліза, вихід концентрату та хвостів для магнітних сепараторів; 8, 14 – загальний обсяг пульпи, грансклад та витрати води на вході, продуктивність за промпродуктом та пісками, вихід готових класів у промпродукті та пісках для дешламаторів; 16 – робочі параметри для вакуум-фільтра); група $q_c=14$ – симплекс, що складається з одного блоку 21 (дистанційне управління та збір даних в комплексі ТП).

Різні значення максимальних розмірностей симплексів формально відображаються в показнику ε рівномірного розподілу зв'язків орієнтованого графу, що має m_1 ребер і m_2 вершин:

$$\varepsilon^2 = \sum_{i=1}^{m_2} (\rho_i - \rho_{cp})^2 = \sum_{i=1}^{m_2} \left(\rho_i - \frac{m_1}{m_2} \right)^2,$$

де ρ_{cp} – середня ступінь вершини [2];

ρ_i – дійсна ступінь i -ї вершини.

Для моделі технологічної лінії магнітного збагачення РЗФ, що розглядається з урахуванням залежності $\rho_{cp} = m_1/m_2 = 65/21 \approx 3,1$ отримуємо

$$\begin{aligned} \varepsilon^2 = & (2-3,1)^2 + (3-3,1)^2 + (3-3,1)^2 + (2-3,1)^2 + (3-3,1)^2 + (2-3,1)^2 + (3-3,1)^2 + \\ & + (3-3,1)^2 + (4-3,1)^2 + (2-3,1)^2 + (3-3,1)^2 + (2-3,1)^2 + (3-3,1)^2 + (3-3,1)^2 + \\ & + (4-3,1)^2 + (3-3,1)^2 + (1-3,1)^2 + (1-3,1)^2 + (2-3,1)^2 + (1-3,1)^2 + (15-3,1)^2. \end{aligned}$$

Отже, остаточно отримуємо $\varepsilon = \sqrt{\varepsilon^2} \approx 12,75$.

Результат $R_K > 0$ показує, що топологічна структура секції РЗФ в умовах ГЗК наближається до кільцевого або повного графа [2], але при $\varepsilon \neq 0$ це не є явно вираженим показником. Порівняльна характеристика різних топологій (послідовна, кільцева, радіальна, деревовидна, повний граф, незв'язна) на підставі R_K і ε , симпліціальний та візуальний аналіз наданої на рис. 1 структури секції РЗФ свідчать, що вона відповідає ієрархічній структурі з кільцевими (зворотними) зв'язками.

Отже, в ієрархічній структурі технологічної лінії (секції) збагачувальної фабрики ГЗК чітко виділяється три взаємодіючих виробничих рівні керування: режимними параметрами (нижній рівень); локальними ТП (середній); комплексом ТП (верхній).

Із застосуванням системного підходу, запропонованого автором [5], для багатостадійного процесу збагачення магнетитових кварцитів (рис. 1) була запропонована структура ієрархічної моделі ІСУ ТП РЗФ, що представлена на рис. 3. Зазначена схема демонструє підпорядкованість окремих підсистем та основні системні зв'язки у складі ІСУ. На рис. 3 прийнято такі умовні позначення: $(i=1, \dots, N_s)$ – кількість стадій ТП збагачення; OU_{ij} – j -й канал управління i -ї стадії для локальних ТП, $(j=1, \dots, k_i)$ – кількість каналів управління i -ї стадії ТП; HP_{ij} – інтелектуальний нейрорегулятор OU_{ij} ; V_{ij} – вектор впливів збурення; Y_{ij} – вектор вихідних характеристик; Y_{ij} – вектор впливів управління; X_{ij} – вектор інформаційних параметрів про стан OU_{ij} ; Y_{ij}^3 – вектор завдань вихідних характеристик (установок); TP_{ij}^* – комплекс всіх локальних ТП i -ї стадії; V_i^* – вектор впливів збурення TP_i^* ; Y_i^* – вектор вихідних характеристик; X_i^* – вектор інформаційних параметрів про поточний стан комплексу; Y_i^{*3} – вектор завдань для вихідних характеристик; HE_i^* – нейроремулятор (прогнозуюча модель) для i -ї стадії.

Так для комплексу ТП початкової 1-ї стадії (припустимо, що для ТП подрібнення $i=1, k_1=2$): 1-й канал (OU_{11}) – співвідношення «руда-вода»; 2-й канал (OU_{12}) – продуктивність млина на виході; $V_{11} = \{\text{гранулометричний склад вхідного продукту}\}$; $V_{12} = \{\text{фізико-хімічні та петрографічні властивості руди}\}$; $Y_{11}, Y_{12} = \{\text{гранулометричний склад промпродукта, вихід готового класу}\}$; $U_{11} = \{\text{витрати води до млина}\}$; $U_{12} = \{\text{вхідна продуктивність по руді}\}$; $X_{11} = \{\text{вміст твердого у млині}\}$; $X_{12} = \{\text{режимні показники для млина}\}$. Аналогічно здійснюється формалізація для решти ТП 1-ї стадії (класифікація, магнітна сепарація тощо). Результуючі характеристики для комплексу ТП усієї стадії формуються як $V_1^* = V_{11} \cup V_{12}$ ($\cup$ – операція логічного поєднання); $Y_1^* = \{\text{якість промпродукту, продуктивність стадії}\}$; $X_1^* = X_{11} \cup X_{12}$.

Верхнім рівнем системи на кожній стадії збагачення в блоці оптимізації здійснюється інтелектуальний аналіз поточного стану об'єкту управління. На підставі аналізу показників усіх стадій збагачення відбувається визначення установок для систем управління відповідних стадій (середнього рівня). При цьому процес прийняття рішень відбувається шляхом інтелектуальної класифікації або глобальної оптимізації [7].

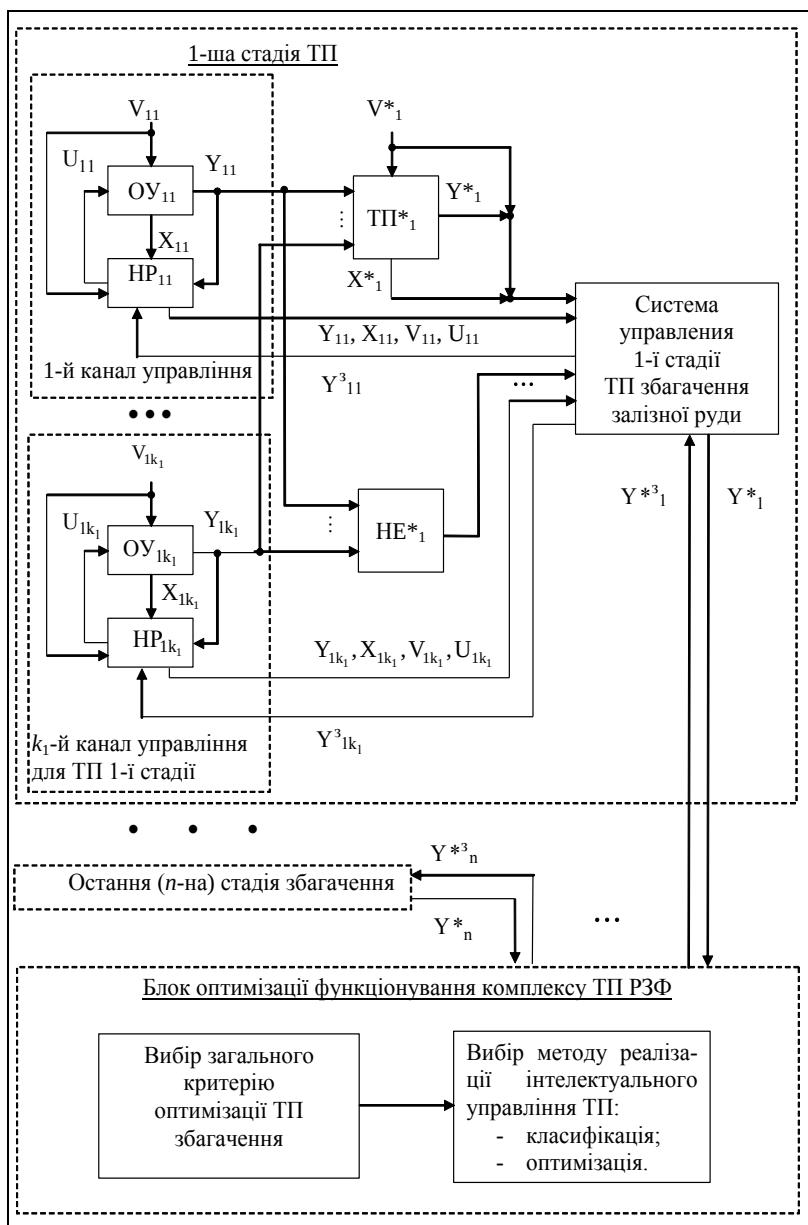


Рис. 3. Схема ієрархічної моделі багатоканальної ІСУ ТП збагачення магнетитових кварцитів

На середньому рівні здійснюється управління комплексом ТП для окремих стадій. Для цього рівень отримує значення оптимальних уставок з верхнього рівня та визначає завдання (доводить ці уставки) для регуляторів всіх локальних ТП та їх відповідних каналів управління кожної стадії збагачення. Із іншого боку системи середнього рівня збирають первинну інформації з підсистем нижнього рівня про стан кожного каналу (керуючі дії, вихід, збурення), здійснюють її первинну обробку, прогнозування значень вхідних та вихідних показників стадії із застосуванням нейроемулаторів (HE_i^*). Визначені дані передаються також на верхній рівень для прийняття рішень та визначення оптимальних уставок з метою узгодженого управління всіма стадіями та комплексом ТП збагачення в цілому.

Нижній рівень системи керує окремими локальними ТП кожної стадії. Для цього рівень містить низку (визначену кількість) каналів управління, причому для окремих локальних ТП можуть існувати декілька каналів. Кожен такий канал має власний нейрорегулятор, завданням роботи такого регулятора є – підтримування необхідного значення уставки, що визначено на верхньому рівні системи та отримано із відповідної підсистеми управління конкретною стадією (тобто середній рівень). У свою чергу підсистема нижнього рівня передає спочатку в систему середнього рівня і далі на верхній рівень інформацію про стан кожного каналу (показники керуючих впливів, значення вихідних та інформаційних сигналів, збурення).

Висновки та напрямки подальших досліджень. Запропонована структура ієрархічної моделі повністю відповідає загальноприйнятій в цей час концепції комплексної автоматизації промислових виробництв та відомим актуальним стандартам з побудови АСУ ТП (ГОСТ 24.104-85, 24.601-86, 24.602-86, 34.602-89), а також міжнародним: МЕК(IEC)-1131, ISA S88, S95 [7]. Тому основними напрямками подальших досліджень автора є розробка інтелектуальних алгоритмів моделі та їх апробація в промислових умовах вітчизняних ГЗК.

Перелік літератури: 1. *Купін А. І.* Обґрунтування використання технологій штучного інтелекту для управління технологічним процесом збагачення магнетитових кварцитів // Вісник КТУ.- Вип.1.-Кривий Ріг: КТУ.-2003.- С.51-55. 2. *Денисов А. А., Колесников Д. Н.* Теория больших систем управления.- Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982.- 287с. 3. *Молчанов А. А.* Моделирование и проектирование сложных систем.- К.: Вища школа, 1988.- 359с. 4. Многосвязные системы управления / *М. В. Мееров, А. В. Ахметзянов, Я. М. Берцанский и др.*; Под ред. *М. В. Меерова.* – М.: Наука, 1990. – 264 с. 5. *Зубов Д. А.* Развитие методов и способов адаптивного автоматизованого керування комплексом технологічних процесів вуглезбагачувальної фабрики: Дис.... д-ра техн. наук: 05.13.07.- Кривий Ріг, 2005.- 534с. 6. *Марюта А. Н.* Автоматическая оптимизация процесса обогащения руд на магнитообогатительных фабриках.- М.: Недра, 1975.- 231с. 7. *Купін А.І.* Інтелектуальна ідентифікація та керування в умовах процесів збагачувальної технології : Монографія. – Кривий Ріг: КТУ. – 2008. – 204 с.

Поступила в редколлегию 21.03.09

А. С. МАЗМАНИШВИЛИ, д-р физ.-мат. наук, профессор,
А. Ю. СИДОРЕНКО, канд. техн. наук, доцент каф. САиУ НТУ «ХПИ»

КОМПЕНСАЦИЯ КВАНТИЛЕЙ НАБЛЮДАЕМЫХ ДАННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СТЬЮДЕНТА ПРИ НАЛИЧИИ КОРРЕЛЯЦИИ

В статті розглянуто типові задачі математичної статистики, що відносяться до корельованих послідовностей (часовим відлікам) з заданим фіксованим рівнем статистичного зв'язку між ними. Одержані аналітичні вирази, що описують розподіл Стюдента у випадку корельованих відліків. Представлені таблиці квантилів розподілу Стюдента при наявності кореляції.

Рассмотрены типичные задачи математической статистики, отнесенные к коррелированным последовательностям (временным отсчетам) с заданным фиксированным уровнем статистической связи между ними. Получены аналитические выражения, описывающие распределение Стюдента для случая коррелированных отсчетов. Представлены таблицы квантилей распределения Стюдента при наличии корреляции.

The typical problems of mathematical statistics, related to correlated sequences (to time counts) with a given fixed level of statistical correlation between them, are considered. The analytic expressions featuring distributions Student's ones in the case of correlated counts are obtained. The distributions Student's quantil's in the case of correlated counts are introduction.

Введение. В теории статистического оценивания и принятия решений обычно предполагается, что элементы наблюдаемых данных (отсчетов) $x_0, x_1, \dots, x_n$ независимы. Сюда относятся распределения χ^2 , Стюдента Фишера [1]. Между тем, возможна ситуация, когда наблюдаемые данные или данные, предназначенные для статистической обработки, в той или иной степени зависимы, то есть присутствует корреляция. Также возможно, что информация о коррелированности данных отсутствует или неизвестна к моменту обработки результатов эксперимента. Тем самым возникает проблема изучения степени влияния корреляции полученных данных на распределения рассматриваемых в задачах математической статистики.

Целью данной работы является изучение влияния корреляции на квантили, известного в математической статистике, распределения Стюдента.

Основная часть. Пусть используемые наборы отсчетов $\{x_0, x_1, \dots, x_N\}$ вместе с нулевым отсчетом x_0 случайной величины X – совокупность сечений объемом N , взятых с постоянным временным шагом из реализации нормального марковского процесса Орнштейна-Уленбека (ОУ-процесса) $x(t)$ с интенсивностью σ и коэффициентом корреляции q , а также известна последовательность $\{y_0, y_1, \dots, y_N\}$ случайной величины Y , которая является

нормальной, независимой от совокупности $\{x_0, x_1, \dots, x_N\}$ и также имеет интенсивность σ .

В данной работе, в выше указанных предположениях, использован дискретный квадратичный функционал, имеющий вид:

$$J = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k^2. \quad (1)$$

Данный функционал имеет равновесную производящую функцию

$$Q_J(\lambda; q, n) \equiv \langle \exp(-\lambda J) \rangle_J \quad (2)$$

следующего вида [5]

$$Q_J(\lambda; q, n) = \left(\frac{(1-q^2)R}{(a_+ - q^2)^2 a_+^{N-1} - (a_- - q^2)^2 a_-^{N-1}} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

где $a_{\pm} = (1 + q^2 + \lambda \sigma^2(1 - q^2)/N \pm R)/2$, $R = [(1 - q^2) + \lambda \sigma^2/n]^2 - 4q^2$;
 q – коэффициент корреляции соседних отсчетов ОУ-процесса.

На основе (1)–(3) рассмотрена случайная величина – стандартизованное отношение Стьюдента

$$T = Y / \sqrt{J} = y_0 \left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k^2 \right)^{-1/2}. \quad (4)$$

Для случайной величины T статистический анализ удобно провести в терминах её характеристической функции $\Psi_T(\xi)$, имеющей вид

$$\Psi_T(\xi) = \left\langle \exp(i\xi Y / \sqrt{J}) \right\rangle_{Y,J}, \quad (5)$$

здесь индексами указаны случайные величины, по которым необходимо произвести статистическое усреднение.

Для допустимых значений q случайная величина $T = Y / \sqrt{J}$ имеет функцию распределения $F_T(t)$ следующего вида [5]

$$F_T(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty Q_J \left(\frac{1 + \mathcal{G}^2}{2} t^2; q, N \right) \frac{d\mathcal{G}}{1 + \mathcal{G}^2}, \quad t > 0. \quad (6)$$

Для выбранных уровней значимости α правосторонние ($t > 0$) квантили t_α определяются из соотношения

$$\alpha = F_T(\infty) - F_T(t_\alpha) = 1 - \frac{1}{\pi} \int_0^\infty Q_J \left(\frac{1 + g^2}{2} t_\alpha^2; q, N \right) \frac{d g}{1 + g^2}. \quad (7)$$

Эти величины отличаются при $q \neq 0$ от стандартных квантилей распределения Стьюдента и переходят в них при $q \rightarrow 0$. Значения уровня значимости α , как правило, достаточно малы, поэтому даже небольшие значения коэффициента корреляции q приводят к заметному изменению $\alpha(t)$ или (при фиксированном уровне α) – к изменению квантиля t_α . Это влияние оказывается достаточно значимым уже при $q \geq 0,2$.

Результаты. На основе (3), (7) создано программное средство, позволяющее построить таблицы квантилей функционала (4) при вариации различных параметров q и N .

В Таблицах 1 и 2 представлены правосторонние квантили с изменяющимся параметром q – коэффициентом корреляции при различных объемах выборки N .

Таблица 1

Правосторонние критические точки t_α функционала T (4) при $N = 10$, $\sigma = 1$

q	$1 - \alpha$				
	0.900	0.950	0.975	0.990	0.995
0.1	0.880	1.374	1.561	1.815	2.770
0.2	0.882	1.378	1.567	1.823	2.789
0.3	0.885	1.386	1.577	1.837	2.822
0.4	0.890	1.398	1.593	1.859	2.874
0.5	0.898	1.417	1.618	1.892	2.951
0.7	0.928	1.490	1.713	2.023	3.254
0.8	0.961	1.571	1.818	2.166	3.584

С увеличением q график функции распределения имеет тенденцию локализоваться вокруг среднего значения функционала T , поэтому значения правосторонних квантилей должны уменьшаться, что имеет место в приведенных таблицах.

Анализируя Таблицы 1 и 2, можно также сделать вывод о том, что с увеличением объема выборки N пороговые значения распределения Стьюдента при наличии корреляции уменьшаются. Это означает, что доверительный интервал уменьшается.

Таблица 2

Правосторонние критические точки t_α функционала Т (4), где $N = 20$, $\sigma = 1$

q	$1 - \alpha$				
	0.900	0.950	0.975	0.990	0.995
0.1	0.860	1.326	1.498	1.726	2.531
0.2	0.861	1.329	1.501	1.731	2.542
0.3	0.863	1.333	1.507	1.738	2.560
0.4	0.866	1.340	1.516	1.751	2.590
0.5	0.871	1.350	1.530	1.770	2.635
0.7	0.889	1.394	1.587	1.847	2.818
0.8	0.910	1.445	1.653	1.938	3.029

Далее проанализируем Таблицы 3 и 4.

Таблица 3

Правосторонние критические точки t_α функционала Т (4) при $q = 0.0001$, $\sigma = 1$

N	$1 - \alpha$				
	0.900	0.950	0.975	0.990	0.995
5	0.920	1.476	1.699	2.015	3.365
10	0.879	1.372	1.559	1.813	2.764
15	0.866	1.341	1.517	1.753	2.603
20	0.860	1.325	1.497	1.725	2.528
25	0.856	1.316	1.485	1.708	2.485
30	0.854	1.310	1.477	1.697	2.457

Таблица 4

Правосторонние критические точки t_α функционала Т (4) при $q = 0.6$, $\sigma = 1$

N	$1 - \alpha$				
	0.900	0.950	0.975	0.990	0.995
5	0.949	1.549	1.794	2.145	3.668
10	0.898	1.417	1.618	1.892	2.951
15	0.880	1.373	1.559	1.811	2.739
20	0.871	1.350	1.530	1.770	2.635
25	0.865	1.337	1.512	1.745	2.573
30	0.861	1.328	1.500	1.728	2.532

Из данных этих таблиц, следует, во-первых, что с увеличением уровня значимости α пороговые значения t_α уменьшаются, и, во-вторых, с увеличением объема выборки N квантили также убывают.

С целью верификации результатов рассмотрено распределение Стьюдента [1] в случае отсутствия корреляции (Таблица 5) с числом степеней свободы N в качестве частного случая распределения функционала Т (4). Сравнивая строки в Таблицах 3 и 5 при $N=10$ можно убедиться в правильности построения таблиц.

Таблица 5

Табличные правосторонние критические точки t_α функционала Стьюдента

N	$1 - \alpha$				
	0.900	0.950	0.975	0.990	0.995
5	0.920	1.476	1.699	2.015	3.365
10	0.879	1.372	1.559	1.813	2.764
15	0.866	1.341	1.517	1.753	2.602
20	0.860	1.325	1.497	1.725	2.528
25	0.856	1.316	1.485	1.708	2.485
30	0.854	1.310	1.477	1.697	2.457

На рис. 1-2 приведены плотности и функции распределения для функционала (4) соответственно.

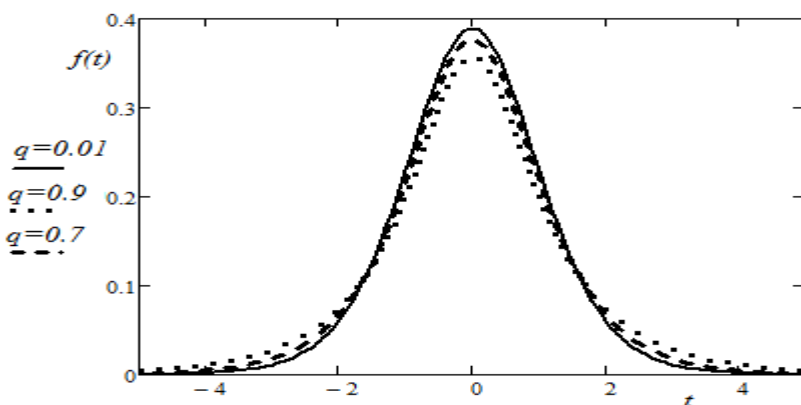


Рис. 1. Плотности распределения вероятностей для функционала (4) с параметрами: $q = 0.01, 0.7, 0.9, N = 10, \sigma = 1$

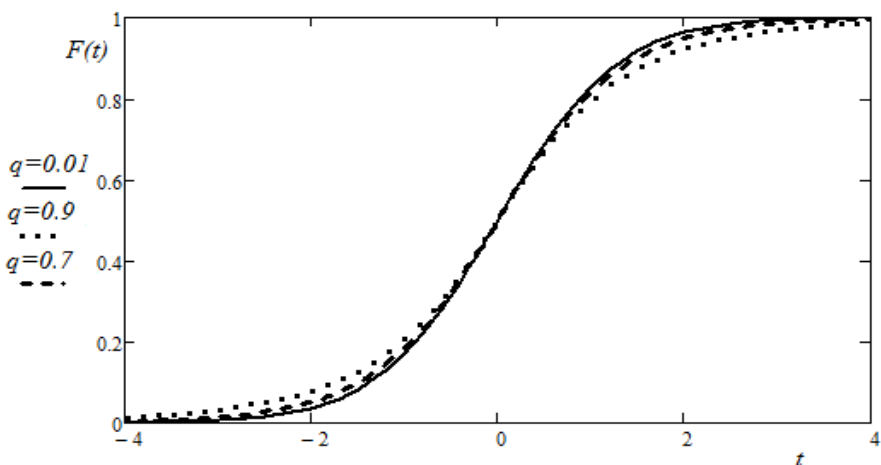


Рис. 2. Графики функции распределения вероятностей для функционала (4) с параметрами: $q = 0.01, 0.7, 0.9$, $N = 10$, $\sigma = 1$

Выводы. В работе впервые получены значения квантилей распределения Стьюдента для случая коррелированных отсчетов. Приведенные таблицы правосторонних пороговых значений t_α могут использоваться для контроля. Полученные результаты подтверждают адекватность модели и могут быть использованы при анализе опытных данных.

Найденные выражения для распределений стандартизованного отношения Стьюдента допускают предельный переход $N \rightarrow \infty$ для отсчетов случайного процесса на заданном интервале. Возможно также обобщение результатов на случаи комплекснозначных или многомерных случайных переменных.

Список литературы: 1. *Ивченко Г. И., Медведев Ю. И.* Математическая статистика. – М.: Высшая школа, 1984. – 248 с. 2. *Пугачев В. С.* Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Наука, 1979. – 496 с. 3. *Рытов С. М.* Введение в статистическую радиофизику. Харьков: Высшая школа, 1990. – С. 5–7. 4. *Тихонов В. И., Миронов М. А.* Марковские процессы. – Вестник НТУ «ХПИ». Сб. научных трудов. Тем. вып. «Системный анализ, управление и информационные технологии». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2005. – № 41. – С. 220–227. 5. *Мазманишвили А. С.* Коррелированные последовательности в задачах статистического оценивания // Доповіді Національної Академії Наук України, 2001, № 7, с.21–25.

Поступила в редколлегию 11.02.09

А. А. ПАВЛОВ, д-р техн. наук, проф. каф. АСОИУ НТУУ «КПИ»,
А. С. ШТАНЬКЕВИЧ, студент НТУУ «КПИ»

ВОССТАНОВЛЕНИЕ НЕИЗВЕСТНОЙ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПО ОГРАНИЧЕННОМУ НАБОРУ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ С ОШИБКОЙ

У статті запропоновано модифікацію методів відновлення невідомої закономірності за невеликим числом експериментальних даних для випадку наявності помилки вимірювань. Наведено приклад використання методу.

В статье предложена модификация методов восстановления неизвестной закономерности по небольшому числу экспериментальных данных для случая наличия ошибки измерений. Приведен пример использования метода.

In the article the modification of methods for recovery of an unknown law by small quantity of experimental data is suggested. The method usage example is stated.

Постановка задачи. В [1] были предложены и обоснованы методы решения задачи восстановления числовой скалярной функции действительных аргументов, однозначно задающей некоторую закономерность, по анализу наблюдаемых данных (вход–выход) ограниченного объема. Однако, в случае наличия ошибки в используемом наборе экспериментальных данных (например, погрешности измерений), методы требуют существенной модификации для эффективного решения задачи восстановления. Далее в статье будут сформулированы и рассмотрены требуемые изменения для предложенных ранее вероятностных методов (методы 2 и 3 из [1]).

Приведем основные определения. Существует некоторая закономерность, которая однозначно задается функцией $f(\bar{x})$, не известной наблюдателю.

Имеются результаты пассивного эксперимента $f(\bar{x}^{-i}) = y_i$, $i = \overline{1, P}$ (P – небольшое число), содержащие ошибку измерений ε (случайная величина). По результатам пассивного эксперимента необходимо найти закономерность, то есть найти истинную функцию $f(\bar{x})$, а не её аппроксимацию. Искомая функция $f(\bar{x})$ представляется взвешенной суммой компонент $\psi_{i_j}(\bar{x})$ на подмножестве I_1 множества известных базовых функций $I = \{\psi_{i_j}(\bar{x}), i = \overline{1, L}\}$:

$$f(\bar{x}) = \sum_{j=1}^K a_{i_j} \psi_{i_j}(\bar{x}), \quad K < P < L \quad (1)$$

где $\psi_i(\bar{x})$ – известные базовые функции, a_i – неизвестные коэффициенты, $\bar{x} \in R_n$ – n -мерный вектор, K – число базовых функций в множестве I_1 , $\psi_{i_j}(\bar{x}) \in I_1$ и заранее не известны.

Модифицированный метод 2 (вероятностный). Если P – число экспериментов – не на много меньше L – числа базовых функций в множестве I , то в предположении, что K (число базовых функций в множестве I_1) существенно меньше P , данный метод с большой вероятностью (легко определяемой как функция от K) дает точное решение по критерию из [1]. Для случая наличия ошибки в используемом для восстановления наборе экспериментальных данных был модифицирован второй этап этого метода.

Этап 1. Случайным образом конструируется последовательность базовых функций

$$\psi_{i_1}(\bar{x}), \psi_{i_2}(\bar{x}), \dots, \psi_{i_L}(\bar{x}). \quad (2)$$

Функции $\psi_{i_{p+1}}(\bar{x}), \dots, \psi_{i_L}(\bar{x})$ исключаются из последовательности (2), получаем последовательность

$$\psi_{i_1}(\bar{x}), \dots, \psi_{i_p}(\bar{x}). \quad (3)$$

В предположении, что базовые функции из множества I_1 находятся в последовательности (3), переходим к этапу 2.

Этап 2. Этот этап итерационный. На каждой итерации из последовательности (13) поочередно исключается каждая базовая функция $\psi_{i_p}(\bar{x})$ и для оставшихся базовых функций решается задача линейного программирования (ЛП)

$$\min \sum_{l=1}^P y_l \quad (4)$$

$$-y_l \leq f\left(\bar{x}^l\right) - \sum_{j=1}^{P-t} a_{i_j} \psi_{i_j}\left(\bar{x}^l\right) \leq y_l \quad (5)$$

$$y_l \geq 0, \quad l = \overline{1, P}.$$

где переменными являются a_{i_j} , $j = \overline{1, P-t}$ и y_l , $l = \overline{1, P}$, а t – текущий порядковый номер итерации (начиная с 1). После решения задачи (4)-(5)

исключенная компонента возвращается в (3).

Когда получены значения показателя качества (4) при исключении каждой компоненты из (3), окончательно из последовательности (3) исключается та компонента, для которой это значение минимально. На этом текущая итерация завершена.

Описанная процедура повторяется. Критерием останова является резкий прирост минимального значения показателя качества (4) на текущей итерации по сравнению с предыдущей, после чего компоненты из (3) более не исключаются (установление граничного значения этого прироста в конкретных практических задачах является предметом статистического исследования метода). Оставшиеся в (3) базовые функции и являются истинными компонентами восстанавливаемой закономерности. Коэффициенты при них получены в последнем решении задачи ЛП (4)-(5) с текущим набором (3) на предпоследней итерации.

Этап 2 может быть ускорен, если в конце каждой итерации из последовательности (3) исключать не одну, а несколько компонент, для которых получены наименьшие значения показателя качества (4) в текущей итерации.

Введенные изменения метода следуют из особенностей решаемой задачи. При наличии ошибки ε минимальное значение показателя качества (4) на любой итерации этапа 2 статистически всегда больше нуля и увеличивается при последовательном удалении компонент из (3). При этом вследствие влияния ε при отбрасывании истинной компоненты получаемое значение показателя (4) не всегда будет превышать любое из значений показателя, полученных при отбрасывании фиктивных компонент, однако не будет минимальным в полученном наборе его значений на текущей итерации. Последнее утверждение, как и, в целом, эффективное применение модифицированного метода 2, имеет место при определенных границах ошибки ε , устанавливаемых статистическими исследованиями метода.

По результатам предварительных исследований эффективности метода были выработаны рекомендации относительно критерия останова итераций этапа 2 (табл. 1). Статистические исследования проводились для случаев, когда восстанавливаемая закономерность зависела от 3 до 5 входных величин (аргументы восстанавливаемой функции), количество базовых компонент в последовательности (3) – входной последовательности для этапа 2 – варьировалось от 15 до 100, а количество истинных компонент, которые требовалось восстановить, изменялось при этом от 2 до 5. При проведении экспериментов вычислялись точные оценки восстанавливаемых функций для случайных сгенерированных значений входных величин, после чего к полученным оценкам прибавлялась случайная величина ε (ошибка), равномерно распределенная в интервале $(-k_\varepsilon \cdot f; k_\varepsilon \cdot f)$, где f – точная оценка восстанавливаемой функции, k_ε – коэффициент зашумления. k_ε в сгенерированных

примерах варьировался от 0,001 до 0,02, при более высоких его значениях неизвестная закономерность восстанавливалась статистически редко.

Таблица 1

Рекомендованные граничные значения коэффициента прироста минимального значения показателя (4) k_{opt} для останова этапа 2 модифицированного метода 2 в зависимости от числа компонент в последовательности (3)

Количество элементов в последовательности (3)	Мин. граничное значение k_{opt}
10	411,88
15	327,09
20	253,49
25	360,07
30	256,04
35	203,60
40	183,28
45	168,32
50	156,85
55	145,01
60	134,63
65	125,09
70	116,21
75	108,97
80	99,34
85	91,27
90	84,86
95	77,89
100	72,32

Метод 3 (вероятностный). Все утверждения в отношении данного метода, изложенные в [1], справедливы также и в случае наличия ошибки в используемом для восстановления наборе экспериментальных данных. Так, данный метод сводится к построению последовательности (2) и применению модифицированного метода 2 нужное количество раз для получения решения поставленной задачи с заданной вероятностью (детально описано в [1]).

Заключение. Изложенные модификации методов 2 и 3 могут эффективно использоваться в практических задачах для восстановления неизвестной закономерности по набору данных пассивного эксперимента, содержащих

ошибку измерений ε . По проведенным исследованиям можно сделать вывод, что предложенные методы особенно эффективны в случаях, когда ошибка ε не превышает 2% от истинного значения, что на практике может соответствовать условиям задачи восстановления точной закономерности при грубых требованиях к измерительным приборам.

Пример. Приведем пример восстановления неизвестной закономерности по результатам пассивного эксперимента, содержащим ошибку измерений ε , с применением модифицированного метода 2.

Пусть имеется закономерность $f(x_1, x_2, x_3, x_4)$. Её истинное выражение, неизвестное исследователю, состоит из двух компонент ($K = 2$) и имеет вид:

$$f(x_1, x_2, x_3, x_4) = -1.1569 \cdot \frac{x_3^2 x_4}{x_1^3 x_2} - 10.2517 \cdot x_2^2 x_3 \quad (6)$$

Пусть также проведено 40 экспериментов ($P = 40$), в результате которых получены оценки неизвестной закономерности (табл. 2), содержащие некоторую ошибку измерений ε (в данном примере ошибка ε имеет равномерное распределение в интервале $(-k_\varepsilon \cdot f; k_\varepsilon \cdot f)$, где f – точное значение неизвестной функции, k_ε – коэффициент зашумления, $k_\varepsilon = 0.009$).

Таблица 2

Результаты пассивного эксперимента

№ эксп.	x_1	x_2	x_3	x_4	$f(x_1, x_2, x_3, x_4)$
1	+2.1165	-9.0054	+3.0700	-7.9078	-2537.15642422
2	+0.4087	+4.8609	-2.2114	+5.3952	+443.83786786
3	-8.0021	-5.0053	+8.5131	-6.8002	-2169.46500967
4	-2.5576	+9.7587	+6.8150	-8.5469	-6664.58925567
5	+4.7753	+1.4053	+2.5028	-9.9808	-49.81259220
6	+6.8859	+3.9424	-2.8453	+6.5617	+450.29283917
7	+0.8676	+0.4977	-0.3404	+2.7476	-0.26923936
8	-5.9096	-1.3885	+4.9655	-2.3072	-97.30253936
9	-6.1665	-1.6907	+7.7483	-7.5765	-224.90974295
10	-1.2545	+1.2902	-6.9635	-6.9882	-35.33509069
11	-8.3049	-0.4434	+9.5221	+7.1077	-21.96607079
12	-8.0023	-2.4945	-3.6066	+0.6226	+232.03867772
13	+2.5783	-0.9534	-6.9706	-4.5868	+49.16157063
14	+4.2356	-7.0788	-7.5737	+0.5863	+3886.83771643

Продолжение табл. 2

15	-8.0476	+5.4021	-1.0713	+6.6859	+320.37610068
16	-8.4204	+5.8121	+3.8760	-6.1894	-1338.71646619
17	-3.9062	-9.0721	-4.2190	+3.1127	+3528.93773065
18	-1.2620	+5.0623	-0.5006	+5.4115	+132.10075784
19	+7.5440	-8.9714	-3.2194	-6.4533	+2670.56500700
20	-4.1086	-3.3509	-4.5514	+1.9004	+527.54245571
21	-6.2152	-7.4419	+3.6616	+5.0244	-2063.86337238
22	+9.9281	-0.1586	+6.8698	+1.5877	-1.20490211
23	+6.8596	-2.7245	-2.7952	-2.7802	+211.48953980
24	-4.2538	-5.8509	-1.9844	-6.0298	+698.39079562
25	-8.1043	+2.9085	-1.9886	+7.1603	+173.81978567
26	-9.6955	-7.6986	-9.0158	-2.6109	+5431.12110435
27	+9.0544	-1.8311	-8.4082	-8.6804	+287.85624015
28	+4.5527	+2.4737	-3.3562	-3.0350	+209.38570907
29	+1.6332	+9.2973	-9.7020	+3.7074	+8554.91821163
30	+6.4841	-0.6785	-1.6540	-3.6276	+7.67650587
31	-9.5750	+4.8119	-4.6473	+2.7897	+1093.43641487
32	-5.1380	-6.4746	-9.8390	-4.1160	+4263.58569621
33	-9.6268	+9.7516	+4.9342	-2.8029	-4768.75138376
34	-0.0690	-9.8866	+4.8232	-8.5365	+66096.12022904
35	-2.5514	-6.8366	-9.3896	+4.0006	+4483.85794420
36	+1.1012	-3.4042	+6.2342	+4.2133	-703.13059664
37	+2.1838	-6.6772	+8.2155	-8.5150	-3774.22887091
38	-6.5666	-9.6278	+1.9927	+1.1854	-1896.35097643
39	+6.2236	+0.5106	+3.4386	-9.1188	-8.23001049
40	-8.0323	-7.2624	-9.0651	+4.7031	+4890.42795779

По данным табл. 2 ставится задача восстановления истинной закономерности $f(x_1, x_2, x_3, x_4)$.

Согласно этапу 1 модифицированного метода 2, не зная истинных компонент и соответствующих коэффициентов функции $f(x_1, x_2, x_3, x_4)$, исследователь сформировал множество из 45 компонент ($L = 45$), возможных, по его мнению, составляющих искомой закономерности, в которое вошли также и компоненты из (6), и упорядочил случайным образом, как показано в табл. 3.

Таблица 3

Компоненты последовательности (2)

№	Комп.	№	Комп.	№	Комп.	№	Комп.	№	Комп.
1	$x_1^2 x_3 x_4$	10	$\frac{x_3^2 x_4^2}{x_1}$	19	$\frac{x_4}{x_1^2}$	28	$\frac{x_4}{x_1}$	37	$\frac{x_2}{x_4}$
2	$\frac{x_1^2 x_4}{x_2 x_3}$	11	$\frac{x_2^3 x_4}{x_1}$	20	$\frac{1}{x_1 x_3^2 x_4^2}$	29	$\frac{x_1^2 x_2}{x_3^3}$	38	$x_3 x_4$
3	$\frac{x_2 x_4^2}{x_1}$	12	$\frac{x_1 x_2^4 x_4}{x_3^2}$	21	$\frac{x_1^2}{x_4}$	30	$\frac{x_1^3 x_4^2}{x_3}$	39	$\frac{1}{x_3}$
4	$\frac{x_1}{x_2 x_3}$	13	$\frac{x_3 x_4}{x_1 x_2}$	22	$x_1 x_4^2$	31	$\frac{x_4}{x_2 x_3}$	40	$\frac{x_3^2 x_4}{x_2}$
5	$\frac{x_1}{x_3 x_4}$	14	$x_2^2 x_3$	23	$\frac{1}{x_2 x_3 x_4^2}$	32	$\frac{x_2}{x_1 x_4}$	41	$\frac{x_2}{x_1 x_4^2}$
6	x_2	15	$\frac{1}{x_1^2 x_2 x_3 x_4^3}$	24	$\frac{x_2 x_3}{x_4^2}$	33	$\frac{x_2^2 x_3^2 x_4^2}{x_1^2}$	42	$1(const)$
7	$\frac{x_1^2 x_3}{x_4}$	16	$\frac{x_2 x_4}{x_3^3}$	25	$\frac{1}{x_1}$	34	$x_2^3 x_4^5$	43	$x_2 x_3 x_4^2$
8	$\frac{1}{x_1^4 x_3^2}$	17	$\frac{1}{x_1 x_3}$	26	$\frac{1}{x_3^3}$	35	$\frac{x_3^2 x_4}{x_1^3 x_2}$	44	$\frac{x_3}{x_1^2 x_2^2 x_4^2}$
9	$\frac{x_3^2}{x_1 x_2}$	18	$\frac{x_4}{x_1 x_3^2}$	27	$\frac{x_2 x_4}{x_3}$	36	$\frac{x_4}{x_1}$	45	$\frac{x_1 x_4^3}{x_2^2}$

Таким образом, исследователь построил последовательность (2). Далее он получает последовательность (3), оставив первые 40 компонент из таблицы 3. Так как в этом случае P не намного меньше L и намного больше K (на практике это обычно предположение исследователя), истинные компоненты неизвестной функции также попали (поскольку велика вероятность этого события) в последовательность (3).

Согласно модифицированному этапу 2 на каждой итерации из (3) последовательно отбрасывается каждая компонента и для оставшихся компонент решается задача (4)-(5). Окончательно исключается та компонента, при отбрасывании которой значение показателя качества (4)

было минимально. В табл. 4 приведены результаты решения задачи (4)-(5) в первой итерации этапа (на этой итерации в (3) входит 40 компонент).

Таблица 4

Первая итерация этапа 2 модифицированного метода 2

№ отбр. компоненты	Значение показ. (4)	№ отбр. компоненты	Значение показ. (4)
1	+6.15798846	21	+19.97473174
2	+11.49255949	22	+10.61960516
3	+52.31254785	23	+15.81905781
4	+12.81325862	24	+19.48833838
5	+29.81379867	25	+8.51000588
6	+2.47518204	26	+24.30393908
7	+52.81285628	27	+21.02555301
8	+43.62772649	28	+15.68329164
9	+18.35329664	29	+24.27761766
10	+28.43070566	30	+25.13257786
11	+32.44892636	31	+8.90352016
12	+22.04431326	32	+23.23289859
13	+24.74367155	33	+57.26741220
14	+3394.77183228	34	+37.10437398
15	+9.23731262	35	+50.13540479
16	+23.90057386	36	+13.14950502
17	+24.35497304	37	+22.88837808
18	+1.78271230	38	+6.42942292
19	+0.48067162	39	+30.76551714
20	+27.97114710	40	+21.53112191

На первой итерации минимальное значение показателя качества (4) получено при отбрасывании компоненты с номером 19, поэтому эта компонента окончательно исключается из последовательности (3) и не участвует в дальнейших итерациях.

Аналогично выполняются следующие итерации этапа 2. Итерации прекращаем, если коэффициент прироста k_{opt} (отношение минимального значения показателя (4) на текущей итерации к этому же значению на предыдущей) составляет не менее 183,28 согласно таблице 1. В табл. 5 приведены результаты всех итераций этапа 2 (в столбцах таблицы: порядко-

вый номер итерации; номер компоненты, окончательно исключаемой из (3); минимальное значение показателя качества (4); коэффициент прироста k_{opt}).

Таблица 5

Результаты итераций

№ итерации	№ отбр. комп.	Мин. значение показателя качества (4)	k_{opt}
1	19	0.48067162	-
2	6	2.54545776	5.2956
3	18	5.42053786	2.1295
4	15	19.20954712	3.5438
5	1	30.77506318	1.6021
6	36	37.08658353	1.2051
7	25	44.49533939	1.1998
8	38	46.86268556	1.0532
9	31	50.34920905	1.0744
10	22	52.37363879	1.0402
11	12	59.34195627	1.1331
12	4	84.13350281	1.4178
13	23	96.69474388	1.1493
14	9	118.18589310	1.2223
15	13	119.65539208	1.0124
16	5	129.30322947	1.0806
17	3	134.44644208	1.0398
18	40	138.02184801	1.0266
19	27	144.22469929	1.0449
20	21	149.00304027	1.0331
21	28	158.09121343	1.0610
22	33	162.60399689	1.0285
23	2	168.23328838	1.0346
24	39	175.25844053	1.0418
25	30	182.07790461	1.0389
26	11	193.13531058	1.0607
27	24	198.51934639	1.0279
28	32	213.66718473	1.0763
29	7	221.85644211	1.0383

Продолжение табл. 5

30	37	230.60620624	1.0394
31	20	246.51191538	1.0690
32	29	252.76363441	1.0254
33	8	254.63230084	1.0074
34	17	256.08642727	1.0057
35	26	256.14460655	1.0002
36	16	256.45106368	1.0012
37	10	257.77143262	1.0051
38	34	285.91669153	1.1092
39	14	69117.12363753	241.7387

На последней итерации компонента с номером 14 не исключается, так как $k_{opt} \approx 242$ ($k_{opt} \geq 183,28$). Таким образом, получили, что закономерность

$f(x_1, x_2, x_3, x_4)$ состоит из компонент с номерами 14 ($x_2^2 x_3$) и 35 ($\frac{x_3^2 x_4}{x_1^3 x_2}$). При

этом значения коэффициентов при этих компонентах в восстанавливаемой закономерности получены в оптимальном решении задачи ЛП (4)-(5) на предпоследней итерации при исключении компоненты с номером 34 (приведены в табл. 6).

Таблица 6

Найденные коэффициенты

№ комп.	Истинные коэффициенты	Найденные коэффициенты	Модуль ошибки
14	-10.25166122	-10.22518428	0.026477
35	-1.15685002	-1.15950170	0.00265

Закономерность $f(x_1, x_2, x_3, x_4)$ восстановлена. Истинные коэффициенты найдены с высокой точностью.

Список литературы: 1. Павлов А. А., Штанькевич А. С. Восстановление неизвестной закономерности по результатам пассивного эксперимента с ограниченным набором данных.– Вестник НТУ «ХПИ».– Харьков: НТУ «ХПИ».– 2009.– № 4.– С. 160-168.

Поступила в редколлегию 10.03.09

Л. Б. КАЩЕЕВ, канд. техн. наук, доцент НТУ «ХПИ»,
И. Г. ПАРХАТСКАЯ, студентка НТУ «ХПИ»,
С.Н. КОВАЛЕНКО, ХНТУСХ им. П. Василенко

ПОИСК КРАТЧАЙШЕГО ПУТИ С ОГРАНИЧЕННЫМ ЧИСЛОМ СНИМАЕМЫХ «ПРОБОК» В ВЕРШИНАХ ГРАФА

В статье предлагаются методы нахождения кратчайшего пути на графе в условиях частичной проходимости вершин. Предложенное решение представляет собой модификацию жадного алгоритма и алгоритма Дейкстры.

У статті пропонуються методи знаходження найкоротшого шляху на графі в умовах часткової прохідності вершин. Запропоноване рішення є модифікацією жадібного алгоритму і алгоритму Дейкстра.

In clause the methods of a presence(finding) of the shortest way on the column in conditions of partial passableness of tops are offered. The offered decision represents updating greedy algorithm and algorithm Dijkstra.

Постановка задачи. Дан неориентированный связный взвешенный граф без кратных ребер. Среди m вершин графа выделено две – A и B , между которыми предстоит построить маршрут минимального веса. Граф двухроматический – его вершины относятся к двум подмножествам – проходимые вершины (на рисунке белого цвета) и непроходимые (на рисунке черного цвета). Через «пробку» проведения маршрута невозможно, но не следует рассматривать такую вершину как полный разрыв маршрута: при проведении маршрута от A к B по условию можно удалить k пробок, сделав этот участок графа проходимым. Требуется провести кратчайший маршрут от A к B , сняв при этом не более k пробок. В принципе, возможна ситуация, когда вообще нельзя построить маршрут от A к B , снимая k или менее пробок.

Описание алгоритма. Рассмотрим решение задачи на пример графа, представленного на рис. 1, по мере рассмотрения будут отмечены аспекты решения задачи в общем виде. Число пробок, которые можно снять при построении маршрута возьмем равным двум ($k=2$).

Начнём построение дерева путей из вершины A (на графе это Γ_1).

Шаг 1. Введём для записи маршрута следующие обозначения:

$$M_{1,2}=(0, 1-2, 0); V_{1,2}=1.$$

Нижний индекс маршрута включает последовательность номеров всех пройденных вершин (в данном случае пока вершины Γ_1 и Γ_2), в скобках через запятую перечислены вершины (проходимая – 0, «пробка» – 1). Суммарный вес маршрута имеет такой же индекс, как и сам маршрут – перечень

пройденных вершин. Вес каждого ребра – 1, т.е. решается задача на минимизацию количества пройденных ребер, алгоритм вполне работоспособен и для идеальных весов ребер. Вес проходимой вершины – 0, вес пройденной «пробки» - некая константа на порядок большая, чем суммарный вес ребер в графе. Формируем два списка:

- список просмотренных вершин $S_{\text{просм}}=(1)$;
- список «замеченных» при просмотре вершин $S_{\text{замеч}}=(2)$.

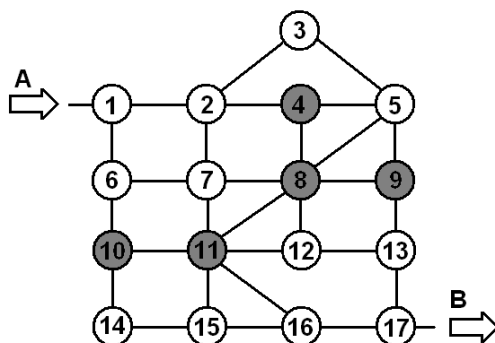


Рис. 1. Пример сети (граф с проходимыми вершинами и «пробками»)

Но из вершины Γ_1 возможен маршрут не только в Γ_2 , но и в вершину Γ_6 . Так что выполняем те же действия и для того направления:

$$M_{1,6}=(0, 1-6, 0); V_{1,6}=1; S_{\text{просм.}}=(1); S_{\text{замеч.}}=(2,6).$$

В данном случае все ребра из вершины 1 просмотрены, и мы включаем вершину 1 в список уже просмотренных вершин.

Шаг 2. Просмотр вершины Γ_2 .

$$M_{1,2,3}=(0, 1-2, 0, 2-3, 0); V_{1,2,3}=2.$$

$$M_{1,2,4}=(0, 1-2, 0, 2-4, 1); V_{1,2,4}=102; S_{\text{просм.}}=(1,2); S_{\text{замеч}}=(6,3,4).$$

Обратим внимание, что вершина 2 просмотрена и перешла из списка замеченных вершин в список просмотренных. Маршрут $M_{1,2,4}$ проходит через «пробку», потому в списке элементов маршрута стоит 1, а вес добавлено 100. Важный момент алгоритма: он рассматривает все смежные вершины графа. Т.е. следовало бы вести маршрут $M_{1,2,1}$, но, судя по списку индексов, у маршрута вершина Γ_1 – это пункт, откуда мы прибыли и ее рассматривать нецелесообразно. В отличие от алгоритма Дейкстры здесь приходится вести маршруты в уже просмотренные вершины. Поясним это примером на рис.2. Для графа в этом примере, если бы мы исключили все просмотренные

вершины, то вершины Γ_6 была бы просмотрена раньше Γ_7 , был бы получен кратчайший маршрут $M_{1,3,6}$, но с одной пробкой, а более длинный маршрут без пробки $M_{12,3,5,7,6}$ не строился бы, поскольку вершина Γ_6 рассмотрена ранее и не включалась бы в последующие маршруты. Эти рассуждения справедливы только для графов с «обычными» проходимыми вершинами. В нашей же задаче выбор маршрута 1-3-6... может привести к превышению количества допустимо снимаемых «пробок». Поэтому следует в качестве промежуточных пунктов маршрутов примерять и уже просмотренные вершины. Для графа на рис.2 в дальнейшем рассмотрении примут участие оба варианта маршрута – и 1-3-6..., и 1-2-4-5-7-6... В зависимости от того, укладывается ли число снятых «пробок» в заданное k ? Будет выбран тот или иной участок маршрута.

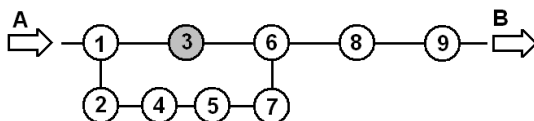


Рис. 2. Пример двух маршрутов – с «пробкой» и без

Таким образом, каждой вершине фактически может быть приписан список маршрутов, по которым она может быть достигнута из стартовой точки. Программно можно не приписывать вершинам графа списки, а хранить их в едином списке маршрутов, контролируя их вес (а, следовательно, и число «пробок»), первый и последний индекс при M .

Шаг 3. Просмотр вершины Γ_6 (при выборе очередной вершины для просмотра принцип first-in-first-out)

$$M_{1,6,7}=(0, 1-6, 0, 6-7, 0); V_{1,6,7}=2. M_{1,6,10}=(0, 1-6, 0, 6-10, 1); V_{1,6,10}=102;$$

$$S_{\text{просм.}}=(1,2,6); S_{\text{замеч}}=(3,4,7,10).$$

Шаг 4. Просмотр вершины Γ_3 .

$$M_{1,2,3,5}=(0, 1-2, 0, 2-3, 0, 3-5, 0); V_{1,2,3,5}=3;$$

$$S_{\text{просм.}}=(1,2,6,3); S_{\text{замеч}}=(4,7,10,5).$$

Шаг 5. Просмотр вершины Γ_4 .

$$M_{1,2,4,5}=(0, 1-2, 0, 2-4, 1, 4-5, 0); V_{1,2,4,5}=103.$$

$$M_{1,2,4,8}=(0, 1-2, 0, 2-4, 1, 4-8, 0); V_{1,2,4,8}=103;$$

$$S_{\text{просм.}}=(1,2,6,3,4); S_{\text{замеч}}=(7,10,5,8).$$

Маршрут $M_{1,2,4,5}$ отбрасываем и более не рассматриваем – он приводит нас к вершине 5, но при этом требует снятия одной «пробки». В эту же

вершину мы можем попасть маршрутом $M_{1,2,3,5}$. Количество снятых «пробок» легко отслеживается путем целочисленного деления на выбранную константу – «вес пробки» (в данном примере 100).

Шаг 6. Просмотр вершины Γ_7 .

$$M_{1,6,7,8}=(0, 1-6, 0, 6-7, 0, 7-8, 1); V_{1,6,7,8}=103.$$

$$M_{1,6,7,11}=(0, 1-6, 0, 6-7, 0, 7-11, 1); V_{1,6,7,11}=103;$$

$$S_{\text{просм.}}=(1,2,6,3,4,7); S_{\text{замеч.}}=(10,5,8,11).$$

Шаг 7. Просмотр вершины Γ_{10} .

$$\underline{M}_{1,6,10,11}=(0, 1-6, 0, 6-10, 1, 10-11, 1); V_{1,6,10,11}=203.$$

Маршрут $M_{1,6,10,11}$ отбрасываем и более не рассматриваем, поскольку у нас есть маршрут $M_{1,6,7,11}$ равного веса ребер, но с меньшим числом «пробок». Если сравнивать их веса, то $V_{1,6,10,11}=203$, а $V_{1,6,7,11}=103$, следовательно, $M_{1,6,7,11}$ при одинаковом количестве ребер требует снятия на одну «пробку» меньше. Отброшенные маршруты помечаем подчеркнутым шрифтом.

$$M_{1,6,10,14}=(0, 1-6, 0, 6-10, 1, 10-14, 0); V_{1,6,10,14}=103;$$

$$S_{\text{просм.}}=(1,2,6,3,4,7,10); S_{\text{замеч.}}=(5,8,11,14).$$

Шаг 8. Просмотр вершины Γ_5 .

$$\underline{M}_{1,2,3,5,8}=(0, 1-2, 0, 2-3, 0, 3-5, 0,5-8,1); V_{1,6,10,11}=104;$$

В данном случае маршрут $M_{1,2,3,5,8}$ отбрасываем, поскольку у нас есть вариант с весом 103 – $M_{1,2,3,5}$ (был еще вариант маршрута через «пробку» $M_{1,2,4,8}$, но мы его отбросили еще на пятом шаге).

$$M_{1,2,3,5,9}=(0, 1-2, 0, 2-3, 0, 3-5, 0,5-9,1); V_{1,6,10,14}=104;$$

$$S_{\text{просм.}}=(1,2,6,3,4,7,10,5); S_{\text{замеч.}}=(8,11,14,9).$$

Шаг 9. Просмотр вершины Γ_8 .

$$\underline{M}_{1,6,7,8,5}=(0, 1-6, 0, 6-7, 0, 7-8, 1,8-15,0); V_{1,6,7,8,15}=104;$$

Есть маршрут $M_{1,2,3,5}$ весом $V_{1,2,3,5}=3$, полученный на четвертом шаге (на ребро меньше и без «пробки»). Потому $\underline{M}_{1,6,7,8,5}$ отбрасываем.

$$\underline{M}_{1,6,7,8,9}=(0, 1-6, 0, 6-7, 0, 7-8, 1,8-9,1); V_{1,6,7,8,9}=204.$$

Маршрут $\underline{M}_{1,6,7,8,9}$ равен по числу ребер маршруту $M_{1,2,3,5,9}$, но $\underline{M}_{1,6,7,8,9}$ проходит через две вершины-«пробки», тогда как $M_{1,2,3,5,9}$ – только через одну. $\underline{M}_{1,6,7,8,9}$ Отбрасываем.

$$M_{1,6,7,8,11}=(0, 1-6, 0, 6-7, 0, 7-8, 1,8-11,1); V_{1,6,7,8,11}=204;$$

$$M_{1,6,7,8,12}=(0, 1-6, 0, 6-7, 0, 7-8, 1, 8-12, 0); V_{1,6,7,8,12}=104;$$

$$S_{\text{просм.}}=(1,2,6,3,4,7,10,5,8); S_{\text{замеч.}}=(11,14,9,12).$$

Шаг 10. Просмотр вершины Γ_{11} .

$$\underline{M}_{1,6,7,11,8}=(0, 1-6, 0, 6-7, 0, 7-11, 1, 11-8, 1); V_{1,6,7,11,8}=204.$$

На шестом шаге получен $M_{1,6,7,8}$, весом $V_{1,6,7,8}=103$. Потому $\underline{M}_{1,6,7,11,8}$ отбрасываем.

$$\underline{M}_{1,6,7,11,10}=(0, 1-6, 0, 6-7, 0, 7-11, 1, 11-10, 1); V_{1,6,7,11,10}=204.$$

На третьем шаге получен $M_{1,6,10}$, весом $V_{1,6,10}=102$. Потому $\underline{M}_{1,6,7,11,10}$ отбрасываем.

$$\underline{M}_{1,6,7,11,12}=(0, 1-6, 0, 6-7, 0, 7-11, 1, 11-12, 0); V_{1,6,7,11,12}=104.$$

Маршрут $\underline{M}_{1,6,7,11,12}$ по числу ребер и «пробок» равен маршруту $M_{1,6,7,8,12}$. А поскольку он «не лучше» уже найденного, то мы более его не рассматриваем.

$$M_{1,6,7,11,15}=(0, 1-6, 0, 6-7, 0, 7-11, 1, 11-15, 0); V_{1,6,10,15}=104;$$

$$M_{1,6,7,11,16}=(0, 1-6, 0, 6-7, 0, 7-11, 1, 11-16, 1); V_{1,6,10,14,16}=204;$$

$$S_{\text{просм.}}=(1,2,6,3,4,7,10,5,8,11); S_{\text{замеч.}}=(14,9,12,15,16).$$

Шаг 11. Просмотр вершины Γ_{14} .

$$\underline{M}_{1,6,10,14,15}=(0, 1-6, 0, 6-10, 1, 10-14, 0, 14-15, 0); V_{1,6,10,14}=104;$$

$$S_{\text{просм.}}=(1,2,6,3,4,7,10,5,8,11,14); S_{\text{замеч.}}=(9,12,15,16).$$

Этот просмотр не добавляет вершин в список «замеченных», кроме того $\underline{M}_{1,6,10,14,15}$, имеет такой же вес, как и $M_{1,6,7,11,15}$, то есть он не улучшает решения, а потому отбрасывается.

Шаг 12. Просмотр вершины Γ_9 .

$$\underline{M}_{1,2,3,5,9,8}=(0, 1-2, 0, 2-3, 0, 3-5, 0, 5-9, 1, 9-8, 1); V_{1,2,3,4,9,13}=204.$$

На шестом шаге получен $M_{1,6,7,8}$, весом $V_{1,6,7,8}=103$. Потому $\underline{M}_{1,2,3,5,9,8}$ отбрасываем.

$$M_{1,2,3,5,9,13}=(0, 1-2, 0, 2-3, 0, 3-5, 0, 5-9, 1, 9-13, 0); V_{1,2,3,4,9,13}=105;$$

$$S_{\text{просм.}}=(1,2,6,3,4,7,10,5,8,11,14,9); S_{\text{замеч.}}=(12,15,16,13).$$

Шаг 13. Просмотр вершины Γ_{12} .

$$\underline{M}_{1,6,7,8,12,11}=(0, 1-6, 0, 6-7, 0, 7-8, 1, 8-12, 0, 12-11, 1); V_{1,6,7,8,12,11}=205.$$

На шестом шаге получен $M_{1,6,7,8}$, весом $V_{1,6,7,8}=103$. Потому $\underline{M}_{16,7,8,12,11}$ отбрасываем.

$$\underline{M}_{1,6,7,8,12,13}=(0, 1-6, 0, 6-7, 0, 7-8, 1, 8-12, 0, 12-13, 0); V_{1,6,7,8,12,13}=105;$$

$$S_{\text{просм.}}=(1,2,6,3,4,7,10,5,8,11,14,9,12); S_{\text{замеч}}=(15,16,13).$$

Маршрут $\underline{M}_{1,6,7,8,12,13}$ равен по весу маршруту $M_{1,2,3,5,9,13}$, полученному на двенадцатом шаге, решение не лучше и из рассмотрения исключается.

Шаг 14. Просмотр вершины Γ_{15} .

$$\underline{M}_{1,6,7,11,15,14}=(0, 1-6, 0, 6-7, 0, 7-11, 1, 11-15, 0, 15-14, 0); V_{1,6,7,11,15,14}=105.$$

На седьмом шаге получен $M_{1,6,10,14}$, весом $V_{1,6,10,14}=103$. Поэтому $\underline{M}_{1,6,7,11,15,14}$ отбрасываем.

$$\underline{M}_{1,6,7,11,15,16}=(0, 1-6, 0, 6-7, 0, 7-11, 1, 11-15, 0, 15-16, 1); V_{1,6,7,11,15,16}=205;$$

$$S_{\text{просм.}}=(1,2,6,3,4,7,10,5,8,11,14,9,12,15); S_{\text{замеч}}=(16,13).$$

Этот маршрут на одно ребро больше, чем маршрут $M_{1,6,7,11,16}$ (соответственно вес 205 больше 204), из решения исключается.

Шаг 15. Просмотр вершины Γ_{16} .

$$M_{1,6,7,11,15,16,11}=(0, 1-6, 0, 6-7, 0, 7-11, 1, 11-15, 0, 15-16, 1, 16-11, 1);$$

Поскольку вершина Γ_{11} уже встречалась на маршруте, то есть получен цикл, что не соответствует определению маршрута на графе, то мы ее не рассматриваем.

$$\underline{M}_{1,6,7,11,15,16,17}=(0, 1-6, 0, 6-7, 0, 7-11, 1, 11-15, 0, 15-16, 1, 16-17, 0);$$

$$V_{1,6,7,11,15,16,17}=206;$$

$$S_{\text{просм.}}=(1,2,6,3,4,7,10,5,8,11,14,9,12,15); S_{\text{замеч}}=(13,17).$$

Шаг 16. Просмотр вершины Γ_{13} .

$$\underline{M}_{1,6,7,8,12,13,9}=(0, 1-6, 0, 6-7, 0, 7-8, 1, 8-12, 0, 12-13, 0, 13-9, 1); V_{1,6,7,8,12,13,9}=206;$$

На восьмом шаге получен $M_{1,2,3,5,9}$, весом $V_{1,2,3,5,9}=104$. Потому $\underline{M}_{1,6,7,8,12,13,9}$ отбрасываем.

$$M_{1,6,7,8,12,13,17}=(0, 1-6, 0, 6-7, 0, 7-8, 1, 8-12, 0, 12-13, 0, 13-17, 0);$$

$$V_{1,6,10,11,15,16,17}=106;$$

$$S_{\text{просм.}}=(1,2,6,3,4,7,10,5,8,11,14,9,12,15,13); S_{\text{замеч}}=(17).$$

Полученный маршрут $M_{1,6,7,8,12,13,17}$ на одну «пробку» меньше полученного на пятнадцатом шаге $\underline{M}_{1,6,7,11,15,16,17}$, потому отбрасываем старый маршрут $M_{1,6,7,11,15,16,17}$.

Шаг 17 (последний). Поскольку в списке не просмотренных вершин осталась только вершина семнадцать, задача считается решенной. Решение - маршрут, доведенный до семнадцатой вершины: $M_{1,6,7,8,12,13,17}$. Маршрут имеет вес 106 – включает шесть ребер и требует прохождения через одну «пробку».

Выводы. Предложенный алгоритм, в принципе, не определяет всех оптимальных маршрутов, а лишь находит количество ребер и снятых «пробок» на оптимальном маршруте и предлагает пример одного из таких маршрутов. Процесс поиска числа ребер и «пробок» на оптимальном маршруте изобразим деревом решений, имеющим явную аналогию с «методом ветвей и границ».

Список литературы: 1. Тябин К. Лабиринт // Наука и жизнь.– 1989.– № 7.– С. 64.
2. Новиков Ф.А. Дискретная математика для программистов. – СПб. .– М. – Харьков: Питер.– 2001.– С. 304

Поступила в редколлегию 05.02.09

УДК 681.3.06

Л.Б.КАЩЕЕВ, канд. техн. нук, доцент НТУ «ХПИ»,
Я.А.ЗАХАРОВА, студент НТУ «ХПИ»

РАЗРАБОТКА СИСТЕМ МАШИННОЙ ГРАФИКИ ДЛЯ ИТЕРАЦИОННОГО ПОСТРОЕНИЯ СИММЕТРИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

У статті проілюстрована подібність деяких кривих з формами природних об'єктів. Пропонується оптимальний метод знаходження схожості з формами найбільш поширених квітів і листя.

В статье проиллюстрировано подобие некоторых кривых с формами природных объектов. Предлагается оптимальный метод нахождения сходства с формами наиболее распространенных цветов и листьев.

In the article similarity of some curves is illustrated with the forms of natural objects. The optimum method of finding of likeness with the forms of the most widespread flowers and leaves is offered.

Постановка задачи. Мир природы демонстрирует нам калейдоскоп разнообразия и неповторимости форм объектов. Особенно в растительном мире легко проследить целесообразность той или иной формы стебля, ствола или листьев – всякое тело стремится принять такую форму, при которой оно обеспечивает минимум энергии его поверхности, совместимую с ориентирующими силами.

Симметрия порождающей среды, в которой образуется тело, накладывается на симметрию тела. Получающаяся при этом форма тела

сохраняет те элементы собственной симметрии, которые совпадают с наложенными на него элементами симметрии среды.

И все же формы и цвета живой природы не во всем соответствуют принципу биологической целесообразности, а во многом следуют общим закономерностям гармонии, выявляющимся путем строгого математического анализа.

Сходство формы некоторых кривых с представителем царства растений было замечено еще древнегреческими математиками. Однако ученые того времени прикладывали колоссальные усилия для вывода уравнений кривых, пытаясь повторить формы природных объектов. С развитием компьютерной эпохи просчет коэффициентов и вывод формул облегчен в десятки, а то и сотни раз по трудоемкости и временным ресурсам.

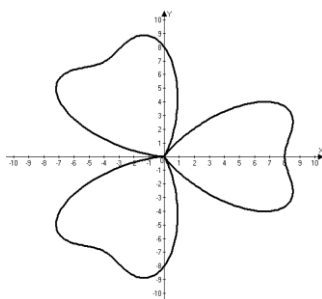
Анализ известных кривых. Сходство формы природных объектов с аналитическими кривыми отмечено исследователями еще до эпохи применения методов компьютерной графики, которые позволили отказаться от индивидуального творческого труда по перебору кривых в пользу итерационного подбора известных формул кривых, отражающих формы наиболее популярные цветов, листьев растений и т.д.

На рис. 1. представлена «Кислица обыкновенная» (еще ее называют трилистником). Однако сложно представить себе форму листа этого растения,

если написать уравнение: $\rho = 4(1 + \cos 3\varphi + \sin^2 3\varphi)$



а)



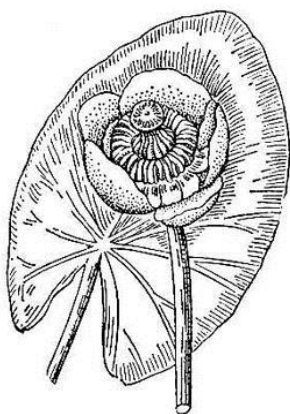
б)

Рис.1. Кислица обыкновенная (а), трилистник (б)

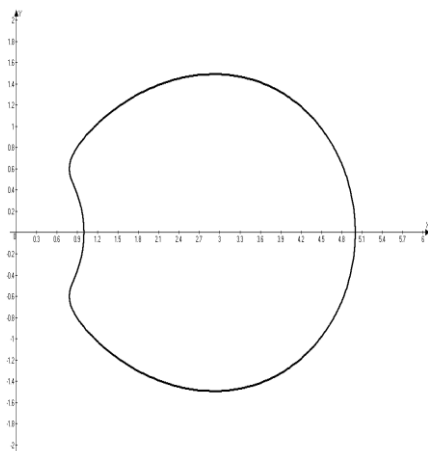
Построенное в полярной системе координат, оно дает кривую, которая в точности воспроизводит формулу листа кислицы (рис.1, б).

Так же похожи очертания «Кубышки желтой» (кувшинки), изображенной на рис. 3, и овала Мюнстера на рис. 4. Эта кривая шестого порядка со сложным уравнением:

$$(x^2 + y^2)^3 - 2ax^3(x^2 + y^2) + (a^2 - r^2)x^4 = 0$$



а)



б)

Рис.2. Кувшинка (а), Овал Мюнстера (б)

Интерес к изучению кривых, утраченный во время средневековья, возродился с открытием метода координат (основы этого метода были изложены Рене Декартом в 1637 году в книге «Геометрия»), который привел к единообразному способу символического задания кривых соответствующими им уравнениями и подготовил открытие анализа бесконечно малых. Новый математический аппарат создал новые возможности для изучения кривых. Многочисленные проблемы механики, астрономии, геодезии, оптики, возникшие в XVII-XVIII веках, стимулировали интерес крупнейших математиков к изучению кривых.

Сам Декарт, применяя метод координат, исследовал кривую, которая получила название «Лепесток жасмина» (рис.5). Уравнение этой кривой:

$$x^2 + y^3 = 3axy$$

Название «Лепесток жасмина» в современной литературе вытеснено другим. Теперь эту кривую называют «Декартов лист» [1].

В XVIII веке итальянский геометр Г.Гранди сделал попытку изобразить уравнениями внешние очертания цветов. Семейство кривых, исследуемых Гранди, получило в математике название роз, хотя по виду эти кривые больше напоминают цветы из семейства сложноцветных.

Весь этот «букет» может быть выражен в полярных координатах уравнением:

$$\rho = a \sin k\varphi,$$

где a и κ - постоянно положительные числа. Задавая различными значениями числа κ , можно получать «цветки» с любым количеством лепестков. Величина a определяет длину лепестка.

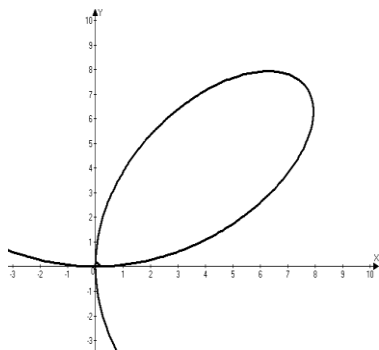


Рис.3. Декартов лист

Задавая различные значения числа κ , можно получать «цветки» с любым количеством лепестков (рис. 4).

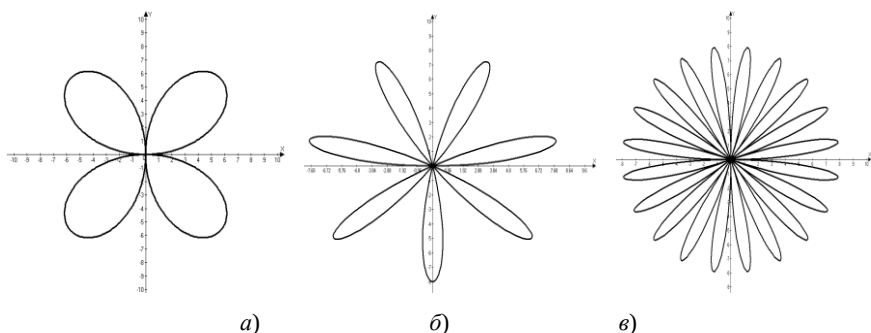


Рис.4. "Роза" при $\kappa = 2$ (а), при $\kappa = 7$ (б), при $\kappa = 10$ (в)

Математическим исследованием формулы цветов и листьев занимался также немецкий геометр Л.Хабенихт. Результаты его исследований опубликованы в сочинении «Аналитические формы листьев» листьев клена, шавеля, ивы. Именно им предложено уравнение формы листа кислицы, график которого показан на рис.1, б. Вот еще одно из уравнений Хабенихта – лист плюща:

$$\rho = 3\left((1 + \cos^2 \varphi) + 2 \cos \varphi + \sin^2 \varphi - 2 \sin^2 3\varphi \cos^4 \frac{\varphi}{2}\right)$$

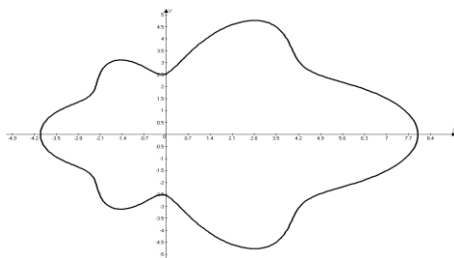
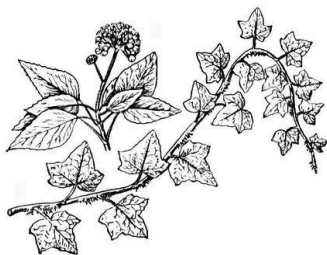


Рис. 5. Лист плюща

Расположение семян растений тоже не раз служило темой математических исследований. Например, установлено, что в корзинке подсолнуха (рис. 6.) семечки расположены по характерным дугам логарифмической спирали. В полярной системе координат логарифмическая спираль выражается уравнением типа $S = a\varphi$, где a – произвольное положительное число. Если $a < 1$, спираль закручивается вокруг центра против часовой стрелки, при $a > 1$ – по часовой стрелке.

Изучение всех этих кривых сыграло немалую роль в развитии математики и техники. Однако эпоха компьютерных технологий позволяет оптимизировать построение множества кривых и с помощью итерационного перебора коэффициентов сопоставлять с природной формой объекта. Это значительно экономит временные ресурсы [2].

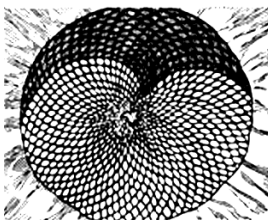


Рис.6. Соцветие подсолнуха

Пример сопоставления кривой с формой листа. Для примера рассмотрим улитку Паскаля (кардиоиду), уравнение которой в полярной системе координат имеет вид:

$$\rho = 2r(1 - \cos \varphi)$$

Варьируя коэффициентом при $\cos(\varphi)$, назовем его условно (a), получаем семейство кривых, отображающее различные формы листьев растений. Отметим прямую зависимость влияния этого коэффициента на степень вогнутости листа (рис. 8).

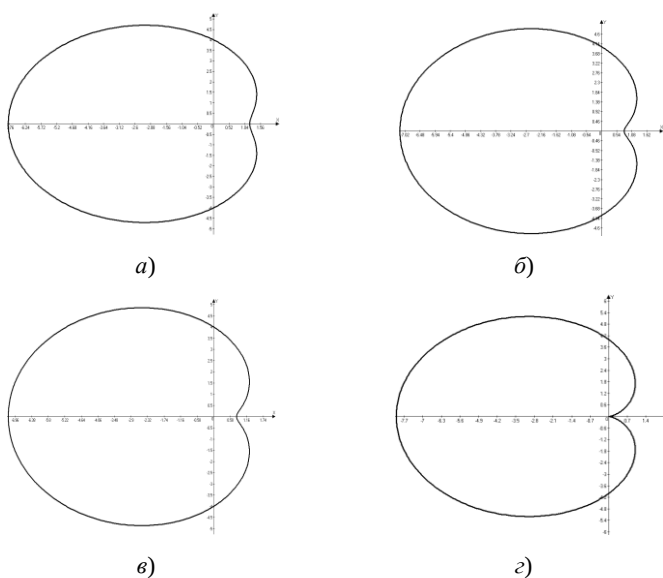


Рис. 8. Кардиоиды при $a = 0.6$ (а), $a = 0.7$ (б), $a = 0.8$ (в), $a = 1$ (г)

Сопоставим эту кривую с наиболее похожим природным объектом растительного мира, например, листом кувшинки (Рис.9).

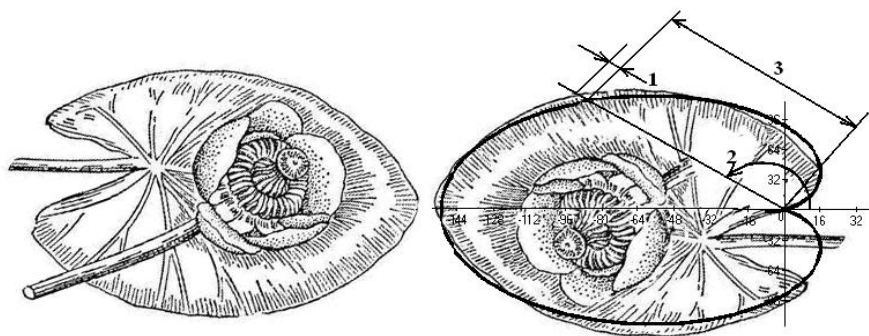


Рис. 9. Сопоставление листа кувшинки с кардиоидой

На рис. 9 обозначено единицей отклонение – $\Delta\rho$, 2 – угол радиус-вектора – φ , а 3 показывает радиус-вектор – $\rho(\varphi)$.

Проведя N радиус-векторов, находим отклонение полученной кривой от живого очертания формы листка при помощи метода наименьших квадратов.

Выводы. Таким образом, итерационно меняя соответствующие параметры семейства кривых, получаем возможность нахождения оптимального сходства форм с наиболее распространенными цветами, листьями, что дает возможность последующего воспроизведения на обоях, плитке на обложках тетрадей, отказавшись от индивидуальной работы.

Список літератури: 1. Гильде В. Зеркальный мир. – М.: «Мир», 1982. 2. Макушев А.И. Замечательные кривые. – М.: «Наука», 1978.

Поступила в редколлегию 17.02.09

УДК 659.12

Е. А. СОХРАНИЧ, студент НТУ «ХПИ»

МАРКЕТИНГОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕКЛАМЫ

В статті пропонуються методи дослідження ефективності реклами. Особлива увага приділяється претестінгу та постестінгу. Інформація була отримана з урахуванням літературних даних та на підставі особистих досліджень одержаних за кордоном. Зроблені висновки о мультиплікативному ефекті досліджуваних методів.

В статье предлагаются методы исследования эффективности рекламы. Особое внимание уделяется претестингу и посттестингу. Информация была получена с учётом литературных данных и на основании личных исследований полученных за рубежом. Сделаны выводы о мультипликативном эффекте исследуемых методов.

In the article there have been proposed methods of research of advertising efficiency. The special attention is spared pre-testing and posttesting. Information was got with a glance of the literary information and on the basis of the personal researches received abroad. Are made have been conclusions about the multiplicative effect of the probed methods.

Проведение рекламной кампании начинается с тестирования рекламы (pre-testing/advertising concept test). Это необходимо для определения привлекательных и раздражающих элементов, для оценки восприятия рекламных сообщений и увеличения эффективности воздействия рекламы на целевую аудиторию.

Задачи тестирования рекламы: определение реакции потребителей на предлагаемые варианты рекламных сообщений; выявление положительных и отрицательных оценок; оценка соответствия рекламы основной идее, оценка убедительности и понятности рекламы. Тестирование позволяет внести необходимые коррективы в рекламные сообщения до начала их размещения.

На этапе подготовки рекламной кампании, целесообразно провести качественное исследование, в то время когда идёт разработка концепции, и материалы могут быть доработаны (перемонтированы, переозвучены и т.д.). Этот метод подскажет, в каком направлении развивать идею, выявит явные недочёты. Доработанные по результатам качественного исследования материалы отправляются на предварительное тестирование.

Обычно для предварительного тестирования лучше всего подходит метод холл-тестов (интервью в специально арендованном помещении). Если тестируются рекламные ролики, то помещение должно быть оборудовано телевизором и видеомагнитофоном. Опрашивается целевая группа, то есть потребители данного продукта/марки. Каждый ролик оценивают не менее 200 человек, для каждой анализируемой подгруппы должно быть не менее 75-100 человек (например, для анализа различий восприятия между мужчинами и женщинами или между различными возрастными группами).

Кроме новых роликов, рекомендуется включить в тест старый /текущий, особенно если он ранее не тестировался. Каждый тестируемый ролик должен быть записан на кассете дважды, и респондент должен просмотреть его 2 раза подряд. Далее с каждым респондентом проводится глубинное интервью.

Структура интервью в каждом конкретном исследовании разрабатывается индивидуально, с учётом всех особенностей продукта и ролика, но есть основные блоки, которые присутствуют всегда. Эти основные блоки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные блоки, использующиеся при разработке структуры интервью

Характеристика блока	Возможные вопросы
Отборочные вопросы (критерии отбора зависят от целевой группы рекламируемого продукта)	- возраст; - потребление тестируемой марки/ продуктовой категории, к которой относится тестируемая марка; - частота потребления продукта и т.д.
Оценка рекламы	- оценка рекламы в целом по шкале (шкала Лайкерта, Стэнгела и др. шкалы); - что именно понравилось? (открытый вопрос); - что не понравилось? (открытый вопрос).
Основная идея рекламы	Для того, чтобы не получить бездумный и бесполезный ответ вроде «они хотят побольше продать», можно использовать несколько вопросов, как правило, различной формулировки: - как Вы думаете, что пытались рассказать создатели рекламы о марке? - какова основная идея этой рекламы? - какое впечатление о марке создает этот рекламный ролик?

Дополнительные вопросы о восприятии и отношении к рекламе в целом и к деталям рекламы.	- что было непонятно? - что не внушает доверия? - понравилась ли музыка? - понравились ли персонажи? Кто больше всего? - девиз / слоган рекламы (запоминаемость, идея, привлекательность); - кто, судя по рекламе, является потребителем этой марки? - связь рекламы с маркой / с категорией продукта.
Имидж марки, сложившийся под влиянием рекламы	Респонденту предлагается выразить согласие или несогласие с высказываниями о рекламируемой марке. Используется не более 25 высказываний, которые отражают следующие понятия: - отношение к этой марке, ощущения о том, что из себя представляет эта марка (великолепный вкус, низкокалорийный продукт, быстро снимает боль и т.д.); - мнение о потреблении этой марки (помогает выглядеть лучше, даёт ощущение новизны, утоляет жажду и т.д.); - представление о потребителях этой марки (весёлые, богатые, активные, сидящие на диете, путешественники и т. д.); - мнение об этой марке (для таких людей, как; популярная; марка-лидер; этой марке можно доверять).
Намерение покупать рекламируемый продукт	Теперь, когда Вы посмотрели этот ролик, какое высказывание лучше всего описывает Вашу заинтересованность в покупке рекламируемого продукта? - определённо куплю; - скорее куплю; - может, куплю, а может, не куплю; - скорее не куплю; - определённо не куплю.
Демография	Образование, семейное положение, занятость и т.д.

Что получаем «на выходе» после предварительного тестирования рекламы?

- определили лучший ролик, плакат и т.д.;
- выяснили, понятна ли основная идея ролика;
- узнали отношение к новым рекламным роликам и рекламируемому продукту в целом;
- поняли, укладывается ли новый ролик в общую рекламную стратегию компании, соответствует ли имиджу марки;
- уточнили, в каких СМИ нужно размещать рекламные материалы и т.д.

После этого, используя данные медиаисследований, разрабатываем медиаплан и параллельно готовимся к измерению эффективности рекламной кампании.

Пример тестирования рекламных концепций. Независимый исследовательский центр РОМИР провел предварительное тестирование 4-х вариантов рекламных концепций туалетной воды NN с целью выбора наиболее привлекательного из них. Использовался метод холл-теста. Выборка состояла из 70 человек. Целевая группа - женщины 20 - 40 лет, которые пользуются недорогой туалетной водой как минимум два раза в неделю. Основная причина выбора победившей концепции, как показало исследование, - наличие изображения Эйфелевой башни на макете печатного объявления. Благодаря этому у большинства зрителей «возникают ассоциации с Францией и Парижем» и «в целом с французской высококачественной косметикой». В набор характеристик составленного по результатам опроса «идеального» варианта вошло также наличие на макете фотографии молодого симпатичного мужчины (что интересно: его присутствие в рекламе одобрили больше респондентов, чем наличие также вполне симпатичной девушки, в особенности это относится к более молодым участницам исследования). А вот такую характеристику, как дорогие ювелирные украшения на фотографии девушки, большинство участников не одобрили. В ходе исследования оценивалось также, насколько каждый из представленных вариантов подходит именно для рекламы туалетной воды, насколько хорошее впечатление о собственно продукте дает реклама, как велика побудительная сила такого объявления, содержат ли разные варианты некую новую интересную информацию о продукте, и кажется ли она рассчитанной именно на участников исследования. Выраженность каждой из этих характеристик оценивалась респондентами по пятибалльной шкале. По всем рассмотренным характеристикам все рекламные концепции получили схожие средние оценки. Это означает, что, по мнению респондентов, рассмотренные утверждения в равной степени подходят ко всем рекламным концепциям.

Один из наиболее популярных вопросов, задаваемых рекламодателем: «насколько эффективной была проведённая рекламная кампания?». Решение этого вопроса отчасти возможно, путём проведения измерений эффективности рекламной кампании.

Для начала стоит определиться, что обычно понимается под «эффективностью рекламы». Это отдача от рекламы на каждую вложенную денежную единицу, увеличение прибыли в результате проведения рекламной кампании. Значит ли это, что рост продаж свидетельствует об эффективной рекламной кампании, а отсутствие такого роста - повод признать усилия рекламистов тщетными? Нет, потому что на практике построить линейную зависимость увеличения объёма продаж от рекламных затрат достаточно сложно. На продажи, кроме рекламы, влияет множество факторов: качество самого продукта, конкурентоспособная цена, налаженная дистрибуция, сезонные колебания, активность конкурентов и т.д. Неорганизованная

дистрибуция может «свести на нет» удачную рекламную кампанию. А если товар не соответствует заявленным в рекламе характеристикам, то после пробной покупки следует отказ от потребления.

Поэтому при измерении эффективности рекламной кампании мы оперируем конкретными показателями, такими как

- повышение уровня знания марки;
- повышение интереса (к новой/ слабой марке);
- поддержание интереса (к сильной марке);
- привлекательность рекламы;
- понятность послания, идеи рекламы;
- позитивные изменения имиджа марки после рекламной кампании.

Существует два основных способа организации замеров: разовые замеры (наиболее экономичный вариант), идеально подходит при планировании разовых, нерегулярных, краткосрочных рекламных кампаний. Мониторинги или трекинговые замеры позволяют кроме оценок рекламы и марки, анализировать накопленный эффект предыдущих кампаний и отслеживать изменение имиджа марки, отношения к марке в целом. Это более затратные, растянутые во времени исследования. Они незаменимы, если марка рекламируется долго или постоянно.

Традиционно требуются два замера - до начала рекламной кампании (так называемый "нулевой замер") и после. В «нулевом замере» мы получаем информацию о текущем положении марки - долю знающих и потребляющих, имидж марки до начала рекламной кампании, «шум» марки (доля людей, которые заявляют о знании или потреблении марки, которой ещё нет на рынке или о знании рекламы до начала рекламной кампании). Кроме того, замеряются аналогичные показатели конкурирующих марок.

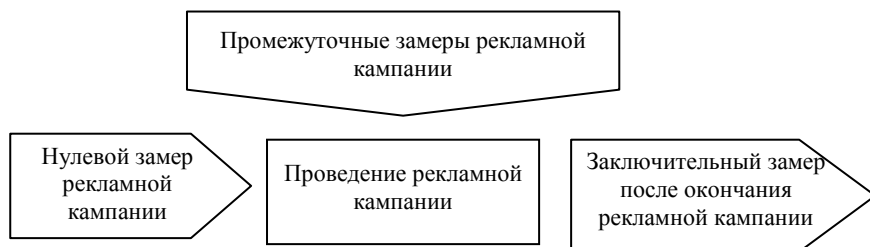
Если рекламная кампания длится достаточно долго, или есть возможность внести коррективы в медиаплан, стоит говорить о проведении промежуточного замера. Обычно он проводится, когда уже есть 3-4 контакта рекламы с целевой аудиторией.

Заключительный замер проводится через месяц после начала рекламной кампании, но не позже, чем через 1 неделю после её завершения.

Описанный подход иллюстрирует приводимый ниже рисунок. Однако у подхода проведения разовых замеров (одного-двух за кампанию) существует существенный недостаток. Зачастую реклама действует с запаздыванием, и наблюдаемые изменения в поведении покупателей могут оказаться результатами предыдущих кампаний или сезонных изменений. Поэтому в результате разовых замеров подчас становится невозможным отследить, насколько действительно эффективной была именно эта кампания.

В таких случаях стоит проводить мониторинговые, трекинговые исследования, которые дают возможность оценивать не только эффект

определённой рекламной кампании, но и анализировать накопительный эффект предыдущей рекламной активности.



Порядок проведения замеров эффективности рекламы

Трекинг (англ. tracking – слежение, отслеживание) – это наблюдение за неким процессом. Трекинговые исследования – это периодически повторяющиеся исследования, каждый раз проводящиеся на одинаковых по своим параметрам выборках респондентов. При этом сами респонденты в выборке каждый раз новые.

Трекинговые исследования необходимы там, где идет непрерывный быстроизменяющийся процесс, требующий постоянного контроля со стороны оператора рынка. Чем быстрее и чаще меняется ситуация на рынке, тем меньше должны быть интервалы между волнами исследования. Если при измерениях долей рынка можно обойтись исследованиями один раз в квартал, иногда и в год, то при замерах знания рекламы, например, нужно опрашивать респондентов значительно чаще. Практика показывает, что знание рекламы и марки очень быстро сходит на нет, если не освежать память потребителей постоянным рекламным воздействием.

Перечень параметров, замеряемых с помощью трекингов, различается в зависимости от товарной категории.

В табл. 2 представлен сборный перечень основных параметров, обычно замеряемых в ходе проведения трекингов. В перечень входят наиболее общие и часто применяемые параметры. Каждому параметру может соответствовать целый блок вопросов в анкете, которую заполняет интервьюер со слов респондента. Если позволяет место, то в анкету добавляются дополнительные вопросы: об осведомленности о проведенных промо-акциях, об ассоциациях, вызываемых различными марками, о стиле жизни и т.п. Обычно рекламодатель старается «отжать» каждого респондента по полной программе – стоимость исследования в большей степени зависит от количества опрошенных респондентов, нежели от количества заданных вопросов.

По методам сбора информации трекинги обычно делятся на три группы: телефонные опросы, личные (face-to-face) интервью по месту жительства респондента и уличные интервью.

Телефонные опросы – удобны и оперативны, но к их недостаткам нужно отнести также невозможность показать респонденту наглядный материал: упаковку, кадр из рекламного ролика, логотип и т.п.

Наиболее содержательные анкеты заполняются на дому у респондента. Полностью тот список параметров, который приведен в таблице, возможно замерить только с помощью домашних (home face-to-face) интервью. В случае с трекингами продолжительность беседы обычно составляет 40-60 минут. Телефонные интервью продолжаются 15-20 минут. Если больше – то существенно снижается внимание респондента. Кроме того, возникает вероятность того, что собеседник просто бросит трубку в середине разговора.

Если интервью берется на улице, на выходе из магазина, то у интервьюера есть в запасе также 15-20 минут. Уличные опросы, уступают по надежности первым двум методам, но часто бывают единственным способом достижения специфической целевой аудитории. Для обеспечения сравнимости выборок разных волн исследования, выборки должны быть достаточно большими, и их структура тщательно контролируется.

Таблица 2

Основные параметры торговой марки и рекламы полученные при трекинговых исследованиях

ПАРАМЕТР	РУССКИЙ АНАЛОГ
Category consumption/purchase	Потребление/покупки категории
Spontaneous/unaided brand awareness	Спонтанное знание марок
Spontaneous/unaided ad awareness	Спонтанное знание рекламы
Prompted/aided brand awareness	Знание марок по подсказке
Prompted/aided brand awareness	Знание рекламы по подсказке
Brand consumption/purchasing	Потребление/покупка марок
Brand trial	Опробование (потребление/покупка)
Brand consumed/purchased most often	Потребляемая/покупаемая марка чаще всего
Brand loyalty	Лояльность к марке
Brand preference	Предпочтение марки
Brand switching	Переключение с марки на марку
Brand overall evaluation	Общая оценка марки
Ad perception	Запоминание и восприятие рекламной кампании
Ad recognition	Узнавание кадров рекламы
Ad liking	Оценка рекламы
Impact on purchase intent	Степень побуждения к покупке
Brand image	Имидж марки
Respondent's profile	Информация о респонденте
Media consumption	СМИ (в которых респондент видел рекламу)

Пример. Метод непрерывного трекинга (continuous tracking), основанный на ротации данных (rolling), впервые был применен в 1976 г. британской исследовательской компанией Millward Brown. Суть этого метода в следующем. Каждую неделю опрашивается определенное количество респондентов, скажем 75. Данные за 4 недели суммируются и размер одной волны выборки, таким образом, составляет 300 человек. В пятую неделю снова опрашиваются 75 респондентов, их ответы вносятся в базу данных, из которой изымаются данные, полученные в первую неделю. Затем, шестая неделя заменяет вторую, седьмая – третью и т.д. Происходит ротация выборки из 300 человек. Волна выборки как бы «катится» по оси времени. В настоящий момент этот метод является одним из наиболее популярных среди трекингов, проводимых в интересах крупных рекламодателей.

Показателем эффективной рекламы будет взаимосвязь между увеличением знания марки и рекламы, потребления марки и затратами на рекламную кампанию. Таким образом, для корректного анализа необходимо включение в модель показателя веса рекламы (будь то затраты на рекламу, GRP, эфирное время и т.п.).

Таким образом, предварительное тестирование рекламных материалов – будь то видео- или аудиоролики, щиты, полиграфическая продукция – имеет огромное значение не только для успешного хода конкретной рекламной кампании, но и для развития имиджа марки, а также конечного коммерческого успеха рекламодателя.

В целом, претестинг и посттестинг являются важным инструментом, позволяющим корректировать и контролировать проведение рекламной кампании. Они помогают избежать ошибок на этапе подготовки рекламной кампании, а также даёт реальную оценку результативности проведённых рекламных мероприятий.

Позитивной тенденцией является то, что в последнее время все более пристальное внимание отечественные производители и рекламные агентства уделяют комплексным маркетинговым исследованиям рекламной продукции и повышению эффективности рекламного воздействия на целевые аудитории.

Список литературы: 1. Лук'янець Т. І. Рекламний менеджмент: Навч. посібник. – 2-ге вид., доп. – К.: КНЕУ, 2003. – 440 с. 2. Уварова А., Шимук А. Маркетинговые исследования в рекламе. – «Рекламные технологии». - 2002г. - № 2(39) апрель. – С. 4-7. 3. Лайдинен Н. В. Предварительное тестирование рекламной продукции. – «Маркетинг в России и за рубежом». – 2001г. - № 5. 4. Ефремов А. Трекинг. – «Индустрия рекламы».- 2002 г. - № 21. 5. Ромат Е. В. Реклама в системе маркетинга: Учебное пособие/ Харьк. гос. академия технол. и орг. питания. - Харьков, 1995. – 229 с

Поступила в редколлегию 18.03.09

В.Б.УСПЕНСКИЙ, канд. техн. наук, доцент НТУ «ХПИ»,
А.В.ГУДЗЕНКО, студент НТУ «ХПИ»

АНАЛИЗ НАБЛЮДАЕМОСТИ В ЗАДАЧЕ УПРАВЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИЕЙ КОСМИЧЕСКОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ПРИСОЕДИНЕННЫМИ УПРУГИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Проведено аналіз спостережності в задачі управління орієнтацією КЛА з приєднаними пружними елементами. Розроблено та перевірено нову чисельну методику аналізу спостережності системи.

Проведен анализ наблюдаемости в задаче управление ориентацией КЛА с присоединенными упругими элементами. Разработана и проверена новая численная методика анализа наблюдаемости системы.

It was carried out the analysis of observability in the task of the spacecraft orientation control with supplemented elastic elements. It was devised and checked a new numeral methodology of observability system analysis.

В настоящее время к системам управления ориентацией космических летательных аппаратов (КЛА) предъявляются чрезвычайно высокие требования по точности переориентации и стабилизации углового положения [1]. Для удовлетворения таким требованиям в законах управления ориентацией желательно учитывать влияние упругих элементов на динамику центрального ядра аппарата. Одним из способов такого учета является реализация в бортовом вычислителе алгоритмов наблюдающего устройства [2] или фильтра Калмана. Назначением этих алгоритмов является получение сглаженных оценок угловой скорости ядра и оценок состояния упругих элементов по измерениям, осуществляемым датчиками угловой скорости (ДУС), расположенными на центральном ядре.

Необходимым условием эффективной работы алгоритмов оценивания является наблюдаемость переменных вектора состояния, в том числе и характеризующих колебания упругих элементов. Учитывая сложность математической модели современного КЛА с упругими элементами [3] проанализировать наблюдаемость полного вектора состояния не представляется возможным. В данной статье проводится такой анализ для упрощенной модели по специально разработанной методике. На основании полученных результатов сделаны обобщающие выводы, которые могут быть полезными при анализе и синтезе систем управления ориентацией современных КЛА.

Рассматривается одноосное вращения КЛА, представляющего собой жесткое центральное ядро с двумя парами симметрично присоединенных упругих элементов в виде однородных стержней с консольной заделкой [4].

Динамические уравнения имеют вид:

$$\begin{cases} I \ddot{\omega} + L \ddot{\bar{x}} = \overline{M}_y \\ \ddot{\bar{x}} + K \dot{\bar{x}} + C \bar{x} = Q \dot{\omega} \end{cases}, \quad (1)$$

где $\bar{x}$ – двухмерный вектор деформации упругих элементов;

ω – угловая скорость;

I – осевой момент инерции;

L – матрица влияния упругих элементов на динамику жесткого ядра;

M_y – управляющий момент;

K – матрица коэффициентов демпфирования;

C – матрица квадратов собственных частот колебаний;

Q – матрица влияния движения жесткого ядра на динамику упругих элементов.

Измерением в данной задаче является угловая скорость ω .

Для анализа наблюдаемости вектора состояния, представляющего собой вектор $y = (\omega; \dot{x}_1; \dot{x}_1; \dot{x}_2; \dot{x}_2)$, воспользуемся известным критерием [5], в соответствии с которым система будет вполне наблюдаемой, если ранг матрицы наблюдаемости

$$Q_n = (P^T \quad A^T P^T \quad A^{2T} P^T \quad \dots \quad A^{(n-1)T} P^T), \quad (2)$$

в которой P – матрица измерений, A – матрица системы (1), приведенной к форме Коши, равен n - размерности вектора состояния.

Наблюдаемость вектора состояния, вообще говоря, - это структурное свойство системы, поэтому его анализ желательно проводить в аналитическом виде. Однако получить аналитические выражения для миноров матрицы наблюдаемости в системах высокого порядка оказывается затруднительным. Поэтому предлагается численная методика анализа параметрической наблюдаемости, применимая, вообще говоря, для задач любой размерности. Она состоит в вычислении и сравнении с нулем всех миноров матрицы Q_n . Корректность использования численной методики обусловлена тем очевидным фактом, что если при каком-либо наборе параметров вектор состояния наблюдаем, то система структурно наблюдаема. Недостатком численной методики является неопределенность «вычислительного нуля», и это усложняет анализ ранга матрицы Q_n . Для

преодоления указанного недостатка предлагается следующая процедура, изложенная на примере рассматриваемой задачи.

Исследуется зависимость наблюдаемости вектора состояния от параметров упругих элементов. С этой целью все параметры упругих элементов, кроме одного, фиксируются, и численно строится зависимость миноров матрицы Q_n от варьируемого параметра. По поведению этой зависимости можно сделать вывод о параметрической наблюдаемости вектора состояния и, что важно для последующего решения задачи оценивания, о степени наблюдаемости в зависимости от варьируемого параметра системы.

Опишем стратегию вычислительного эксперимента. Вначале примем все одноименные параметры упругих элементов равными. В этом случае аналитически нетрудно показать, что переменные x_1, x_2 , равно как и $\dot{x}_1, \dot{x}_2$, неразделимы с точки зрения влияния на жесткое ядро и, следовательно, система не вполне наблюдаема. Для определения параметров упругих элементов, существенно влияющих на наблюдаемость, примем равными все одноименные параметры упругих элементов, кроме одного. Вычисляя определитель матрицы наблюдаемости в зависимости от варьируемого параметра, делаем вывод о влиянии этого параметра на наблюдаемость системы. Перебирая в качестве варьируемых все параметры первого упругого элемента, выявляем те, которые влияют на наблюдаемость наиболее существенно.

В результате вычислительного эксперимента установлено:

- при варьировании собственной частоты первого упругого элемента система всегда наблюдаема, за исключением нулевой частоты и частоты, совпадающей с собственной частотой второго упругого элемента. В указанных случаях определитель матрицы наблюдаемости принимает значение «вычислительного нуля» (рис.1);
- при варьировании коэффициента демпфирования первого упругого элемента система всегда наблюдаема, за исключением значения, совпадающего с одноименным параметром второго упругого элемента. В последнем случае определитель матрицы наблюдаемости близок к нулю (рис.2);
- система остается ненаблюдаемой при варьировании параметров взаимовлияния жесткого ядра и упругих элементов при равенстве прочих параметров упругих элементов. Определитель матрицы Q_n остается в окрестностях «вычислительного нуля» (рис.3,4). Точки «А» на рисунках соответствуют случаю параметрической эквивалентности упругих элементов, для которого аналитически доказана ненаблюдаемость системы, и дают представление о величине «вычислительного нуля».



Рис. 1. Зависимость определителя матрицы Q_n от квадрата собственной частоты первого упругого элемента

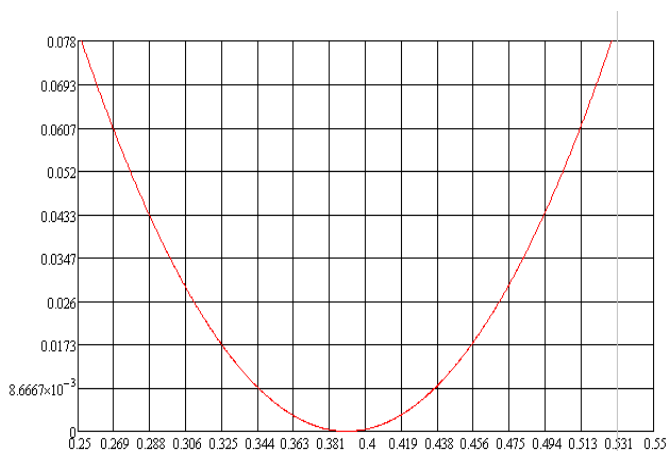


Рис. 2. Зависимость определителя матрицы Q_n от коэффициента демпфирования первого упругого элемента

Таким образом, численный анализ наблюдаемости рассматриваемой системы одноосного вращения КЛА с двумя присоединенными упругими элементами позволяет сделать следующие выводы:

- пятимерный вектор состояния системы вполне наблюдаем по измерениям угловой скорости, если упругие элементы различаются собственными частотами или коэффициентами демпфирования;
- чем существеннее различаются упругие элементы по указанным параметрам, тем больше определитель матрицы наблюдаемости и,

следовательно, выше степень наблюдаемости. Различие собственных частот существенно влияют на степень наблюдаемости, чем коэффициент демпфирования;

- свойство наблюдаемости системы инвариантно к параметрам взаимовлияния упругих элементов и жесткого ядра;
- по значению определителя матрицы наблюдаемости при варьировании параметров взаимовлияния упругих элементов и жесткого ядра можно судить о значении «вычислительного нуля».

Для подтверждения полученных результатов синтезировано наблюдающее устройство и проведено моделирование процесса оценивания вектора состояния упругих элементов

$z = (x_1; \dot{x}_1; x_2; \dot{x}_2)$ по измерениям угловой скорости ядра. Результаты моделирования представлены на рис. 5.

На рис. 5 представлены графики изменения ошибки одной переменной состояния от времени для различных значений собственных частот. Кривая №1 соответствует собственной частоте, для которой были рассчитаны значения коэффициентов для наблюдающего устройства, поэтому она имеет наименьшее время переходного процесса. Кривые №2 и №3 имеют меньшее и большее значения на 10% соответственно при тех же значениях коэффициентов для наблюдающего устройства. Видно, что переходный процесс так же стабилизируется, но за большее время.

Следовательно, для условий приближенных к реальным, в которых значения коэффициентов точно не известно, использование наблюдающего устройства позволяет эффективно оценивать вектор состояния.

Результаты для остальных переменных вектора состояния оказываются аналогичными.

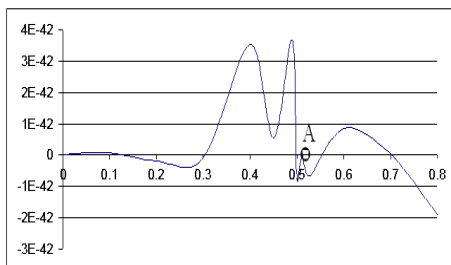


Рис.3. Зависимость определителя матрицы Q_n от параметра влияния первого упругого элемента на жесткое ядро

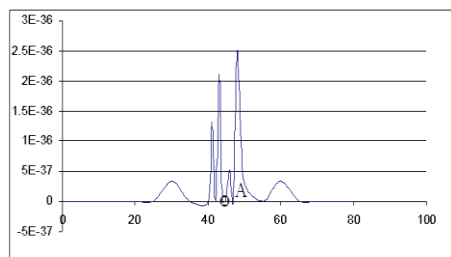


Рис. 4. Зависимость определителя матрицы Q_n от параметра влияния движения жесткого ядра на динамику первого упругого элемента

Результаты моделирования, представленные на рис. 5, подтверждают теоретические выводы. Это следует из того, что ошибка оценивания вектора состояния упругих элементов стремится к нулю.

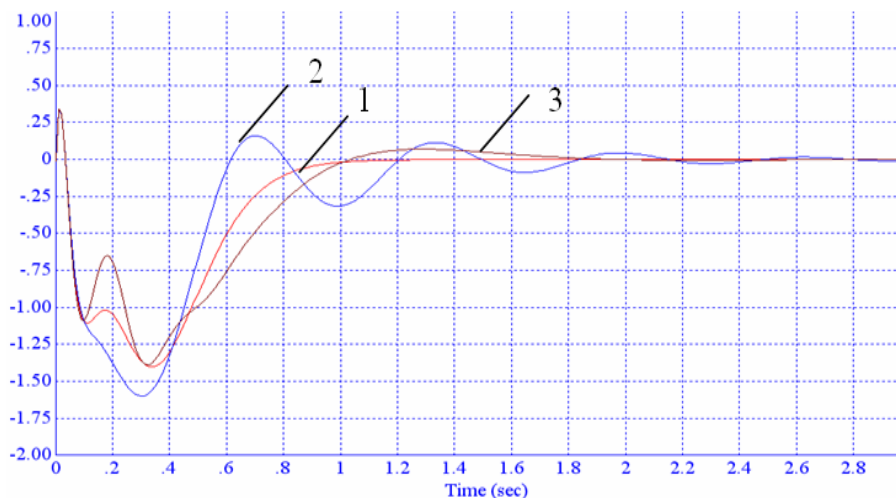


Рис. 5. Зависимость ошибки наблюдения переменной x_1 от времени для разных значений собственных частот

Из полученных выше результатов можно сделать вывод, что исходная система является наблюдаемой, если есть существенное различие в квадратах собственных частот или коэффициентах демпфирования. Если же эти коэффициенты одинаковы или близки, то упругие элементы разделить нельзя и, следовательно, система не наблюдаема. Синтезированное на основе этих выводов наблюдающее устройство подтвердило эти результаты.

Список литературы: 1. Сорокин А.В., Бакшеев Н.И. и др. Гиросиловая система ориентации космического аппарата «Ресурс-ДК» // Труды IX Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. – 27-29 мая 2002. – С. 268–274. 2. Леднев Г.Я. система ориентации деформируемого космического аппарата с динамическим фильтром // Косм. исслед. – 1990. – 28, №3. – С. 329–335. 3. Успенский В.Б., Асютин А.Д. Разработка вычислительной модели вращения упругого КЛА, управляемого с помощью гироскопов // Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Тематический выпуск «Системный анализ, управление и информационные технологии». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2007. – № 18. – С. 105–110. 4. Дегтярев Г.Л., Сиразетдинов Т.К. Теоретические основы оптимального управления упругими космическими аппаратами. – М.: Машиностроение. – 1986. – 216 с. 5. Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. М.: «Машиностроение», 1976. – 184 с.

Поступила в редколлегию 20.03.09

В. Б. УСПЕНСКИЙ, канд. техн. наук, доцент НТУ «ХПИ»
Н. Е. ХАЦЬКО, аспирант НТУ «ХПИ»

РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МЕТОДИКИ ПАСПОРТИЗАЦИИ МИКРОАКСЕЛЕРОМЕТРА

Розроблено новий експериментальний метод паспортизації датчиків вимірювання лінійного прискорення, який вирізняється тим, що може бути реалізований з використанням не атестованого лабораторного обладнання. Результати експерименту було оброблено з використанням нової методики і отримано параметри моделі похибок досліджуваного датчика.

Разработан новый экспериментальный метод паспортизации датчиков измерения линейного ускорения, отличающийся тем, что его можно реализовать с использованием не аттестованного лабораторного оборудования. Результаты эксперимента были обработаны с использованием новой методики и получены параметры ошибок исследованного акселерометра.

The new experimental method of the linear acceleration measuring sensors certification is developed. It is differing from other because it can be realized with using non certificated laboratorial equipment. The experiment results were processed by using of new methodology and certification parameters of investigated sensor measuring axis was obtained.

Введение. В настоящее время в различных технических устройствах широкое применение находят микроэлектромеханические системы (МЭМС). Относительно низкая стоимость МЭМС-гироскопов и МЭМС-акселерометров в сочетании с использованием сигналов глобальных спутниковых радионавигационных систем GPS/ГЛОНАСС стимулирует разработку малогабаритных интегрированных инерциально-спутниковых систем (ИИСС), используемых для навигации и управления движущимися объектами различного назначения.

Для повышения точности измерений МЭМС-датчиков в программном обеспечении ИИСС используются компенсирующие модели погрешности измерений, индивидуальные параметры которых определяются в лабораторных условиях в процессе паспортизации каждого датчика.

Постановка задачи. В данной статье рассматривается задача определения параметров модели погрешности микроакселерометра с целью ее дальнейшей алгоритмической компенсации и, как следствие, повышения точности функционирования ИИСС.

Известно, что подобные методики строятся либо на прямых измерениях ускорения в сравнении с эталоном [1], либо по результату функционирования алгоритмов инерциальной навигации [2]. Чаще всего оба подхода сочетаются: первый обеспечивает получение «грубых» оценок, которые затем используются для компенсации во время применения второго, уточняющего, подхода.

Предлагаемая методика относится к первой группе. Ее отличительная особенность – применимость для одного датчика, а не для трех, как в [3], а также использование простейшего лабораторного оборудования и оснастки.

Таким образом, решаемая задача состоит в разработке и экспериментальной проверке методики определения инструментальных погрешностей микроакселерометра, применимой в условиях плохого метрологического обеспечения.

Описание стенда и условий проведения измерений.

Для проведения эксперимента был использован поворотный стол, опорная платформа которого может вручную поворачиваться вокруг одной из горизонтальных осей на угол до ± 65 град. с точностью в несколько угловых минут. На платформу крепится модуль, сделанный в виде профилированного куба, с паспортизуемым акселерометром, ось чувствительности которого параллельна посадочной площадке модуля. Исследуемый акселерометр (ADXL203 фирмы Analog Device) благодаря высокой чувствительности применим для измерения статического гравитационного ускорения и определения угла наклона оси чувствительности датчика относительно горизонтальной плоскости. Эта особенность использована в разработанной методике. Аналоговый выход акселерометра оцифровывается с помощью аналого-цифрового преобразователя ADS110. Измерения обновляются с частотой 50 Гц и для уменьшения влияния шума усредняются на интервале времени 30 сек. Серии измерений проводятся для разных углов наклона платформы в одной установке модуля на платформе и одном запуске датчика.

Модель и погрешности измерений. Однократное оцифрованное измерение акселерометра в момент времени t_k можно представить в виде целого числа импульсов

$$N^* = \text{Entier} \left[\frac{g \cdot \sin \alpha^* + \delta \alpha^* + \xi}{k^*} \right], \quad (1)$$

где g - модуль ускорения свободного падения; α^* - истинный угол наклона оси чувствительности датчика относительно плоскости горизонта; $\delta \alpha^*$, ξ - соответственно смещение «нуля» и случайный дрейф измерителя, приведенные к размерности м/с^2 ; k - фактическое значение масштабного коэффициента. Ближайшей к (1) «гладкой» зависимостью является выражение

$$N = \frac{g \cdot \sin \alpha^* + \delta \alpha^* + \xi}{k^*}, \quad (2)$$

относительно которого можно утверждать, что

$$N = (N^* + 0.5 \cdot \text{sign}(N^*)) + \nu,$$

где ν - реализация в момент времени t_k центрированной случайной величины из отрезка $[-0.5; +0.5]$ - ошибки дискретизации. Если вместо N и N^* воспользоваться значениями $\hat{N}$ и $\hat{N}^*$, полученными усреднением на достаточно большом количестве измерений, то очевидно, что $\hat{N} \approx \hat{N}^* + 0.5 \cdot \text{sign}(\hat{N}^*)$. Таким образом, после усреднения выражение (2) можно представить в виде

$$\hat{N}^* + 0.5 \cdot \text{sign}(\hat{N}^*) = \frac{g \cdot \sin \alpha^* + \delta \alpha^*}{k^*}. \quad (3)$$

В этих условиях задача паспортизации состоит в получении оценок $\delta \alpha$, k одноименных параметров модели (1) по измерениям $\hat{N}^*$ при различных устанавливаемых углах α^* . В основу решения задачи полагается соотношение (3).

Линеаризация модели. Представим истинное значение угла α^* в виде

$$\alpha^* = \alpha + \delta \alpha, \quad (4)$$

где α - установленный с помощью поворотного механизма угол наклона платформы; $\delta \alpha$ - постоянная методическая ошибка, связанная с неточностью исходной выставки платформы относительно горизонтальной плоскости, не идеальностью формы модуля и не точностью монтажа датчика на посадочной площадке.

Для фактического масштабного коэффициента k^* аналогично примем:

$$k^* = k_0 + \delta k, \quad (5)$$

где k_0 - некоторое номинальное значение коэффициента, определяемое по специальной методике; δk - неизвестная поправка, индивидуальная для каждого датчика.

Пользуясь предположением сопоставимой малости и постоянства в запуске параметров $\delta \alpha$, δk , $\Delta k = \delta k / k_0$ - относительной погрешности коэффициента, для (3) с учетом (4), (5) получаем линейное приближение

$$\delta \alpha + g \cos \alpha \cdot \delta \alpha - g \sin \alpha \cdot \Delta k = (\hat{N}^* + 0.5 \text{sign}(\hat{N}^*)) k_0 - g \sin \alpha, \quad (6)$$

правая часть которого вычисляется по фактическим измерениям, в левая содержит искомые параметры модели погрешности.

Полученное уравнение (6) является определяющим соотношением методики и полагается в основу решения задачи идентификации. Таким образом, для определения искомых параметров следует провести ряд измерений, с учетом которых построить и решить систему линейных алгебраических уравнений вида (6). Легко видеть, что для невырожденности матрицы системы достаточно провести измерения при существенно различных углах наклона платформы.

Критерии достоверности идентификации погрешности акселерометра. Одним из способов подтверждения достоверности разработанной методики является имитационное моделирование показаний акселерометров по формуле (1) и работы самой методики. Критерием достоверности в этих условиях является совпадение погрешностей, используемых при имитационном моделировании, и результатов идентификации.

Уже на этапе моделирования установлено, что случайные погрешности, вносимые специально и спонтанно возникающие вследствие вычислительных ошибок, не позволяют устойчиво оценить искомые характеристики при малом числе измерений. Поэтому методика предполагает проведение серии измерений, числом существенно более 3, при различных углах наклона платформы. Получаемая при этом избыточная система линейных уравнений решается с помощью метода наименьших квадратов (МНК).

При обработке экспериментальных данных приведенный выше критерий достоверности по очевидным причинам не применим. В этих условиях косвенным показателем достоверности получаемых результатов является, во-первых, их правдоподобность, во-вторых, стабилизация оценки, получаемой с помощью МНК при увеличении числа измерений, в-третьих, - воспроизводимость получаемых оценок в различных запусках измерителя.

Методика проведения эксперимента.

1. Горизонтирование поверхности поворотного стола.

Плоскость опорной платформы устанавливается горизонтально при помощи пузырьковых уровней, расположенных на основании стола.

2. Проведение измерений и определение номинального значения масштабного коэффициента по формуле

$$k_0 = \frac{2g}{N^{\uparrow} - N^{\downarrow}}, \quad (7)$$

в которой $N^{\uparrow}$ и $N^{\downarrow}$ - измерения ускорения свободного падения при расположении оси чувствительности акселерометра «вверх» и «вниз» соответственно. Измерения усредняются в каждом положении на интервале 60 сек., в результате чего было получено значение $0,00769 \text{ м/с}^2$.

3. Проведение измерений для оценки погрешностей АИ.

Измеряется величина проекции вектора ускорения свободного падения на ось чувствительности АИ для шестидесяти различных углов наклона

платформы к горизонтальной плоскости с шагом в 1° . Измерения проводятся в нескольких сериях для оценки воспроизводимости результатов.

4. Обработка и анализ результатов:

- по результатам измерений в запуске составляется избыточная система уравнений вида (6) и вычисляются оценки искомых параметров;
- контролируется вычисляемая оценка по введенному критерию стабилизации (рис.1);

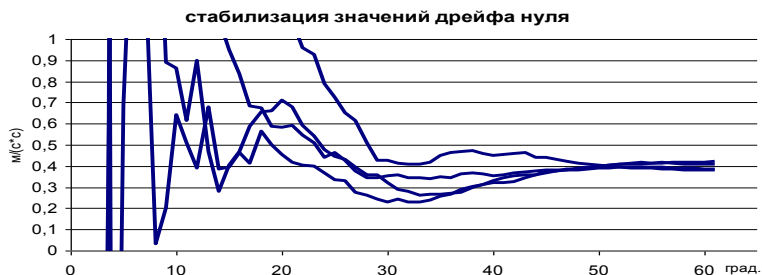


Рис. 1. Стабилизация оценок в ходе работы МНК по измерениям серии экспериментов

- моделируется ряд измерений с внесенными в него погрешностями, вычисленными ранее, и строятся невязки измеренных и модельных значений ряда для оценивания качества аппроксимации (рис.2);

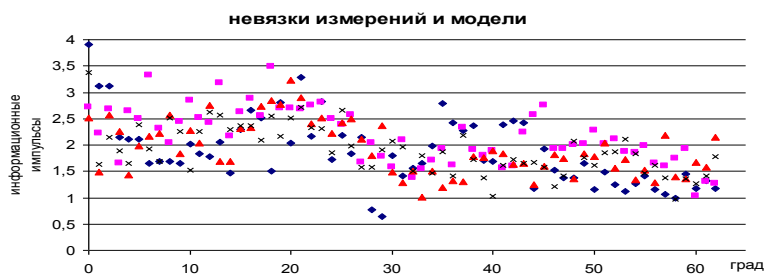


Рис. 2. Невязки измерений и модельных рядов

- для каждого параметра в различных запусках вычисляется среднее значение и среднеквадратическое отклонение. Строятся доверительные интервалы отклонений величины параметра (рис.3);

- оценивается воспроизводимость оценок и находится пересечение доверительных интервалов для каждого параметра. По результирующему интервалу делается вывод о параметрах компенсирующей модели погрешности измерений.

По горизонтальной оси на графиках отложены значения углов выставки опорного стола, по вертикальной – количество информационных импульсов.

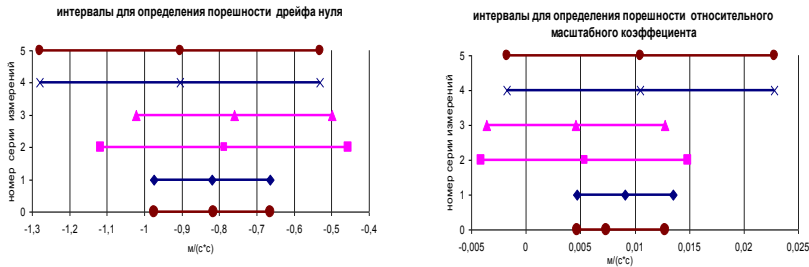


Рис. 3. Доверительные интервалы отклонения величины параметра

Выводы

1. Введение компенсационной модели погрешностей в обработку измерений АИ снизили совокупный уровень ошибки измерения в одной серии запусков с 0,9 до 0,2 информационного импульса (рис.4).
2. Остаточная погрешность измерений находится на уровне воспроизводимости результатов паспортизации АИ в различных запусках.
3. Влияние изменения внешней температуры и уровня измеряемого сигнала (из ограниченных диапазонов) на совокупную погрешность измерений незначительна.

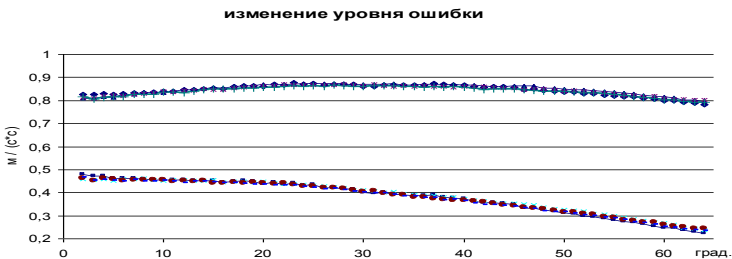


Рис. 4. Изменение уровня ошибки после введения компенсационных паспортных погрешностей

4. В результате реализации описанной методики получены следующие указанные в приводимой справа таблице значения погрешностей для трех экземпляров АИ серии ADXL203.

Погрешности:	дрейфа нуля	относ. масшт. коэф.
Экземпляр 1	0,08	0,01
Экземпляр 2	0,37	0,024
Экземпляр 3	-0,82	0,001

Заключение. В данной работе изложена методика калибровки АИ на основе измерения ускорения свободного падения. Построена модель погрешности измерений АИ, получено определяющее соотношение; критерии оценки эффективности методики; описаны эксперимент, обработка и анализ результатов. Разработанная методика позволяет за счет стендовой калибровки и дальнейшего использования компенсационной модели существенно повысить точность измерения кажущегося ускорения. Результаты апробации убеждают в эффективности методики.

Список литературы: 1. Лене С.Н. Математическое моделирование скалярного метода калибровки избыточных измерителей ускорения. // Научные труды «МАТИ» - РГТУ им. Циолковского, 2005. - вып.4 (80).-С.205-209. 2. Блинов М.С. Вахитов Т.Н., Колчев А.Б., Успенский В.Б. Оценка параметров углов неортогональностей с помощью прямой методики и по результатам решения навигационной задачи // Гирскопия и навигация. - 2004. - №4 (47). – С.77-80. 3. Анкейчев В.С., Атаманов Н.А., Поликовский Е.Ф. Методика калибровки акселерометров // XXI научно-техн. конф. памяти Н.И. Острякова. – Санкт-Петербург: ЦНИИ «Электроприбор». - 1998.

Поступила в редакцию 05.02.09

УДК 004.89:65.011.56

А.Е. ГОЛОСКОКОВ, профессор НТУ «ХПИ»,
А.В. РУДНИЦКИЙ, аспирант НТУ «ХПИ»

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕЧИ ПРОКАТНОГО СТАНА В ЗАДАЧЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ ПЕЧИ

Авторами статті сформована математична модель печі прокатного стану в задачі інтелектуального управління температурою. Математическая модель построена в виде дифференциальных уравнений, затем по полученным уравнениям построены передаточные функции. Реализация модели осуществлена в математическом пакете MATLAB.

Авторами статті сформирована математическая модель печи прокатного стану в задаче интеллектуального управления температурой. Математична модель наведена у вигляді диференціальних рівнянь, наступним кроком на основі цих рівнянь побудовані передатні функції. Модель реалізована у математичному пакеті MATLAB.

Mathematical model of rolling mill kiln in task of temperature intelligent control has been built by article authors. Mathematical model purposed as differential equations, next step was transfer functions development based on differential equations. Model was implemented in mathematical package MATLAB.

Введение. В предыдущих статьях авторов [1-3] установлена необходимость построения аналитической модели печи прокатного стану. В

статье описана математическая модель печи прокатного стана в задаче интеллектуального управления температурой печи.

Математическая модель. Электропечь сопротивления представляет собой сложную многосвязную структуру (см. рис. 1), звенья которой: нагревательные элементы, стенки теплоизоляции, изделие и т.д. – связаны между собой законами теплообмена. Динамическая характеристика электропечи сопротивления зависит от динамических характеристик звеньев, образующих ее структуру.

В ходе исследования авторами сформирована функциональная схема системы автоматического регулирования температуры в печи прокатного стана, представленная на рисунке 1. На указанном рисунке, элемент 1 – задающее устройство для автоматического ввода заданного значения регулируемой температуры; 2 – орган сравнения действительного и заданного значений температуры, предназначенный для определения отклонения; 3 – регулирующее устройство, формирующий регулирующее воздействие в зависимости от и его знака отклонения. Регулирующее устройство придает системе необходимые статические и динамические свойства, так как именно в нем формируется закон регулирования, т.е. зависимость между отклонением и регулирующим воздействием; элемент 4 – исполнительное устройство, которое является выходным силовым органом регулятора и непосредственно воздействует на объект регулирования 5; элемент 6 – датчик, осуществляющий измерение температуры.

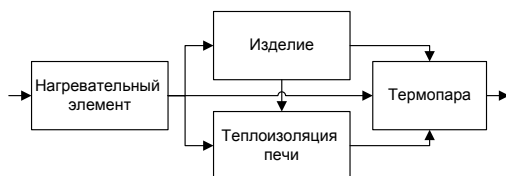


Рис. 1. – Структурная схема печи прокатного стана

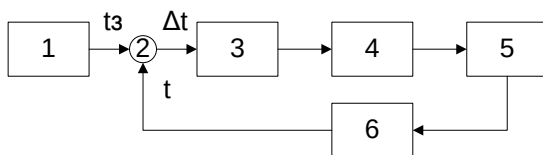


Рис. 2. - Функциональная схема системы автоматического регулирования температуры в печи

В ходе технологического процесса печь прокатного стана функционирует в следующих температурных режимах:

- 1) нагрев печи,
- 2) нагрев заготовки.

Первым этапом происходит нагрев печи до заданного значения температуры в печи. На этом этапе предъявляются высокие требования к соответствию заданной температуре, а также соответствие закону нагрева, в силу особенностей нагревательного элемента.

Затем в печь загружается пакет металлических пластин, предназначенный для прокатки. В этом режиме печь опять нагревается до заданной температуры. В данном режиме необходимо соблюдать соответствие заданной температуре, т.к. при превышении температуры пакет металлических пластин преобразуется в бракованный материал.

Нагревательный элемент и изделие в большинстве случаев можно считать теплотехническими тонкими телами. Приведем ниже дифференциальное уравнение, описывающее поведение нагревательного элемента:

$$T_1 \frac{dy_1}{dt} + y_1 = U_1,$$

где y_1 - выход, изменение температуры в печи, и U_1 - вход, мощность нагрева. Формула определения коэффициента T_1 приведена ниже.

Теплоизоляция печи прокатного стана рассматривается как элемент, описываемый дифференциальным уравнением:

$$T_2 \frac{dy_2}{dt} + y_2 = U_2,$$

где y_2 - выход, измененная температура, и U_2 - вход, температура в печи.

В приведенной выше формуле: $T_2 = \lambda c_2 \gamma / \alpha_2^2$ - постоянная времени футеровки, с.

Как указано выше, изделие может быть рассмотрено как теплотехническое тонкое тело, следовательно, может быть описано следующим дифференциальным уравнением:

$$T_3 \frac{dy_3}{dt} + y_3 = U_3,$$

где y_3 - выход, измененная температура, и U_3 - вход, температура в печи.

В приведенных формулах для нагревательного элемента и изделия: $T_n = c_n g_n / \alpha_n F_n$ - постоянная времени n -го звена, с, в которой c_n - удельная теплоемкость, Дж/(кг*К); g_n - масса, кг; F_n - поверхность звена, $\alpha_n = 4C_{npn} T_{0n}^3 10^{-8}$ - коэффициент теплоотдачи, Дж/(м²*с*К), C_{npn} - приведенная излучательная способность n -го звена, Дж(м²*с*К⁴); T_{0n} - температура n -го звена в установившемся режиме, К.

Термопара как объект описывается дифференциальным уравнением:

$$T_4 \frac{dy_4}{dt} + y_4 = U_4 ,$$

где y_4 - выход, термо-э.д.с. (Вольт), и U_4 - входная величина, измеряемая температура.

Приведенные выше дифференциальные уравнения представим в виде передаточных функций. Так для нагревательного элемента получим передаточную функцию:

$$W_1(s) = \frac{1}{T_1 s + 1} .$$

Для теплоизоляции печи прокатного стана:

$$W_2(s) = \frac{1}{T_2 s + 1} .$$

В ходе преобразования получаем передаточную функцию изделия:

$$W_3(s) = \frac{1}{T_3 s + 1} .$$

Для термопары сформирована следующая передаточная функция:

$$W_4(s) = \frac{1}{T_4 s + 1} .$$

Анализ взаимосвязи звеньев печи лучше всего производить по ее структурной схеме, которую можно рассматривать как аналог дифференциальных уравнений.

Для электропечи сопротивления, состоящей из трех звеньев (нагревателя, стенки и изделия) и термопары, осуществляющей контроль температуры и установленной в произвольной точке рабочего пространства печи, математическая модель, построенная в пакете MATLAB, изображена на рис. 3.

Изменение подводимой мощности m , т. е. управляющее воздействие, поступает на вход нагревателя $W_1(s)$, что приводит к его отклонению на величину Δv_1 . В результате воздействия нагревателя на стенку, описываемую с помощью передаточной функции $W_2(s)$, происходит отклонение температуры на величину Δv_2 . Аналогично для изделия, описываемого с помощью

передаточной функции $W_3(s)$, происходит отклонение температуры на величину Δv_3 .

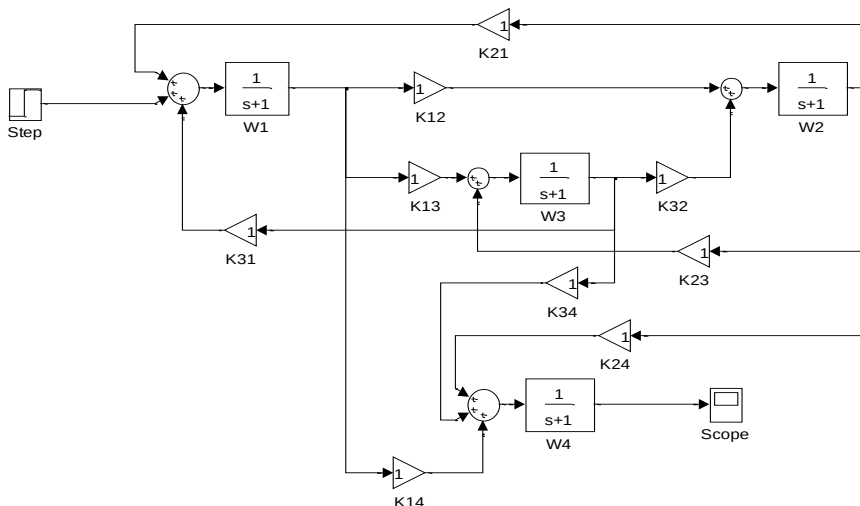


Рис. 3. – Математическая модель печи прокатного стана, построенная в пакете MATLAB

Из схемы следует, что каждое из звеньев охвачено положительными обратными связями. Это означает, что отклонения температуры в печи и их характер определяется взаимным влиянием звеньев.

Зависимость отклонений температуры всех звеньев печи от ее параметров и управляющего воздействия – подводимой мощности – описана системой уравнений в операторной форме:

$$\begin{cases} \Delta \bar{v}_1(s) = [\bar{m}(s)f + K_{12}\bar{v}_2(s) + K_{31}\bar{v}_3(s)]W_1(s); \\ \Delta \bar{v}_2(s) = [K_{21}\bar{v}_1(s) + K_{32}\bar{v}_3(s)]W_2(s); \\ \Delta \bar{v}_3(s) = [K_{13}\bar{v}_1(s) + K_{23}\bar{v}_2(s)]W_3(s); \end{cases}$$

где $\Delta \bar{v}_n(s) = \Delta T_n(s)/T_{0n}$ - изображение по Лапласу относительно отклонения температуры n -го звена под влиянием входного воздействия; T_{0n} - температура звена в установившемся режиме; $\bar{m}(s) = \Delta P(s)/P_0$ - изображение по Лапласу относительного изменения входного воздействия (мощности); P_0 - мощность, необходимая для поддержания в печи стационарного режима на заданном температурном уровне и приходящаяся на 1 м² поверхности

футеровки Дж/с; K_{ij} - коэффициент, отражающий влияние i -го звена на j -е и зависящий от взаимного расположения, излучательной способности и соотношения уровней температур звеньев печи;

$f = P_0 / \alpha_1 F_1 T_{01}$ - коэффициент передачи печи по температуре нагревателя; α_1 - коэффициент теплоотдачи нагревателя; F_1 - поверхность нагревателя.

Температура в произвольной точке рабочего пространства печи, в которой может находиться термопара термоэлектрического термометра, определяется влиянием на нее всех звеньев печи:

$$\Delta \bar{v}_4(s) = K_{14} \bar{v}_1(s) + K_{24} \bar{v}_2(s) + K_{34} \bar{v}_3(s).$$

Отклонение температуры термопары определяется:

$$\Delta \bar{v}_{m.n.}(s) = \bar{v}_4(s) W_4(s),$$

где W_4 - передаточная функция термопары.

Следующим этапом авторы предполагают нахождения коэффициентов K_{ij} и f путем использования технических характеристик печи прокатного стана.

Полученная таким образом математическая модель печи прокатного стана будет использована для изучения в рамках управления температурой с помощью ПИД - регулятора.

Выводы. В работе приведена математическая модель печи прокатного стана в задаче интеллектуального управления температурой, которая построена в математическом пакете MATLAB. Полученная авторами модель будет использована для исследования особенностей управления температурой печи с помощью ПИД – регулятора, а также для построения интеллектуальной системы управления температурой в печи.

Список литературы: 1. Голоскоков А.Е., Рудницкий А.В. Разработка математического и программного обеспечения интеллектуальной системы управления технологическим процессом горячей прокатки пакетов металлических пластин // Вестник НТУ «ХПИ». Харьков: НТУ «ХПИ» – 2005. – №59 – С. 37-42. 2. Голоскоков А.Е., Рудницкий А.В., Борц Б.В. Разработка математического и программного обеспечения интеллектуальной системы управления технологическим процессом горячей прокатки пакетов металлических пластин // Вестник НТУ «ХПИ». Харьков: НТУ «ХПИ» – 2006. – №19 – С. 17-24. 3. Голоскоков А.Е., Рудницкий А.В. Задачи процесса интеллектуального управления температурой и вакуумом печи прокатного стана пластин // Вестник НТУ «ХПИ». Харьков: НТУ «ХПИ» – 2007. – №72 – С. 57-62. 4. Альтгаузен А.П., Бершинский М.Д., Смеянский М.Я. и др. Электрооборудование и автоматика электротермических установок: (Справочник) – М.: Энергия, 1978 – 304 С.

Поступила в редколлегию 25.03.09

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Любчик Л. М., Джулгаков Д. В.</i> Синергетические свойства обратных динамических систем.....	3
<i>Сейед Моджтаба Джафари Хенджани, Северин В. П.</i> Моделирование и оптимизация систем автоматического управления уровнем воды в парогенераторах АЭС с реакторами ВВЭР-1000.....	9
<i>Орловский Д. Л., Выборнова Е. С.</i> Информационная поддержка принятия решений при ситуационном управлении процессами ценообразования коммерческого предприятия	15
<i>Годлевский М. Д., Станкевич А. А.</i> Принципы структурно-параметрического синтеза модели транспортно-складской системы транснациональной логистической компании.....	23
<i>Гомозов Е. П., Мезерная М. В.</i> Моделирование оценки бизнеса с помощью уравнений типа Блека-Сколза.....	30
<i>Кадигроб С. В., Серая О. В.</i> Многофакторные бислучайные модели безотказности систем.....	34
<i>Запара Е. В.</i> Принципы моделирования конкурентного оптового рынка электроэнергии	40
<i>Годлевский М. Д., Рубин Э. Е., Никитчук С. С.</i> Принципы управления функционированием и развитием холдинга на основе ключевых показателей эффективности	46
<i>Цуманенко А. О.</i> Дослідження стратегії конкурентної переваги банку на підставі використання економіко математичних методів	55
<i>Конохова Ю. В.</i> Математическая модель формирования капитала страховой компании с учетом дохода от размещения резервов	59
<i>Клименко А. А., Раскин Л. Г.</i> Проблема «лечения особых-инвалидов» при формировании популяций в генетических алгоритмах	64
<i>Самокиш А. С., Марченко Н. А.</i> Применение нейронных сетей для ранней диагностики онкологических заболеваний	70
<i>Дорофеев Ю. И., Чайка А. Д.</i> Синтез системы управления неминимально-фазовыми объектами на основе искусственной нейронной сети.....	75
<i>Колбасин В. А., Ширяева Н. С.</i> Использование вычислительных ресурсов видеокарт при создании клиент-серверной системы обработки растровых изображений	82
<i>Шеховцов В. А.</i> Режими використання інтерактивного середовища підтримки інтерактивного збору вимог якості програмного забезпечення	87
<i>Луговой С. С., Шахновский Ю. С.</i> Анализ условий допустимости перестановки правил между цепочками в системе фильтрации пакетов.....	93
<i>Тоница О. В., Каплун П. С.</i> Моделирование сети передачи данных	101
<i>Успенский В. Б., Звягинцев О. К.</i> Оптимизация структуры избыточной системы неравноточных датчиков.....	105

Гринберг Г. Л., Любчик М. Л. Идентификация нелинейных функций предпочтения в задачах многокритериального экспертного оценивания.....	111
Любчик Л. М., Шпатенко С. А. Анализ динамических моделей энергорынка методом разделения движений.....	117
Багмут И. А. К вопросу о мере наблюдаемости.....	121
Юхно Е. А. Параметрический синтез системы управления температурным режимом термоциклера	133
Купін А. І. Ієрархічна модель інформаційних та управляючих потоків в умовах технологічної лінії магнітозбагачувальної фабрики ГЗК	138
Мазманишвили А. С., Сидоренко А. Ю. Компенсация квантилей наблюдаемых данных распределения Стюдента при наличии корреляции	146
Павлов А. А., Штанькевич А. С. Восстановление неизвестной закономерности по ограниченному набору экспериментальных данных с ошибкой	152
Кащеев Л. Б., Пархатская И. Г. Коваленко С. Н. Поиск кратчайшего пути с ограниченным числом снимаемых «пробок» в вершинах графа	162
Кащеев Л. Б., Захарова Я. А. Разработка систем машинной графики для итерационного построения симметрических изображений	168
Сохранич Е. А. Маркетинговые исследования эффективности рекламы.....	174
Успенский В. Б., Гудзенко А. В. Анализ наблюдаемости в задаче управления ориентацией космического летательного аппарата с присоединенными упругими элементами.....	182
Успенский В. Б., Хацько Н. Е. Разработка и экспериментальная проверка методики паспортизации микроакселерометра	188
Голоскоков А. Е., Рудницкий А. В. Математическая модель печи прокатного стана в задаче интеллектуального управления температурой печи.....	194

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»**

Збірник наукових праць

Тематичний випуск
«Системний аналіз, управління
та інформаційні технології»

Випуск 10

Наукові редактори М. Д. Годлевський, О.С.Куценко
Технічний редактор М. І. Безменов

Відповідальний за випуск І. Б. Обухова

Обл.-вид № 71-09.

Підп. до друку 26.05.09 р. Формат 60×84 1/16. Папір офісний.
Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 8,5. Облік.-вид. арк. 10,1.
Наклад 100 прим. Зам. № 5. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ».

Свідоцтво державну реєстрацію № 116 від 10.07.2000 р.
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

ФОП Стеценко І. І., 61019, Харків, пр. Ілліча, 103а, кв. 21,
тел. 758-17-35