

# ВЕСТНИК

НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО  
УНИВЕРСИТЕТА «ХПИ»

*Сборник научных трудов*

*Тематический выпуск «Системный анализ,  
управление и информационные технологии»* 18'2007

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. ДАНЫКО, д-р техн. наук, проф.

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

П.А. КАЧАНОВ, д-р техн. наук, проф.

А.Ф. КИРИЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.

В.Б. КЛЕПИКОВ, д-р техн. наук, проф.

В.И. КРАВЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.

В.А. ЛОЗОВОЙ, 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.

А.Ф. ШЕХОВЦОВ, 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.

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

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

В.Я. ЗАРУБА, д-р экон. наук, проф.

И.В. КОНОНЕНКО, д-р техн. наук, проф.

Л.М. ЛЮБЧИК, д-р техн. наук, проф.

А.С. МАЗМАНИШВИЛИ, д-р физ.-мат. наук,  
проф.

Л.Г. РАСКИН, 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

УДК 681.5+519.7+519.8+004

**Вестник НТУ «ХПИ».** Сборник научных трудов. Тематический выпуск «Системный анализ, управление и информационные технологии». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2007. – № 41. – 204 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 наукових співробітників, викладачів, аспірантів, спеціалістів.

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, специалистов.

**Друкується за рішенням Вченої ради НТУ «ХПИ»,  
протокол № 6 від 01.07.2007 р.**

*Л. М. ЛЮБЧИК*, д-р техн. наук, зав. каф. НТУ «ХПИ», (г. Харьков)  
*Д. Н. НУРМАХМАТОВ*, зам. директора ПО «ЦВЕТМЕТ», (г. Москва)

## **СИНТЕЗ СЕЛЕКТИВНО-ИНВАРИАНТНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ УРОВНЕЙ ВОДЫ В КАСКАДАХ ВОДОХРАНИЛИЩ**

Розглядається задача управління рівнями води в каскадах водосховищ в умовах річкового стоку, що змінюється. Одержані рівняння багатовимірних дискретних регуляторів, що здійснюють стабілізацію рівнів води і компенсацію впливу збурень стоку.

Рассматривается задача управления уровнями воды в каскадах водохранилищ в условиях изменяющегося речного стока. Получены уравнения многомерных дискретных регуляторов, осуществляющих стабилизацию уровней воды и компенсацию влияния возмущений стока.

The problem of water levels control in the cascades of storage reservoirs in the conditions of changing river flow is considered. Multivariable discrete controller's equations which ensure water levels stabilization and flow disturbance compensation are got.

**Введение.** На современном этапе развития энергетики особое значение приобретает проблема совершенствования автоматизированного управления сложными гидроэнергетическими системами и комплексами. Наиболее эффективное совместное использование водных и гидроэнергетических ресурсов достигается при строительстве на реках каскадов ГЭС, образующих единый водохозяйственный комплекс. Создание каскадов ГЭС позволяет обеспечить эффективное регулирование речного стока и маневрирование вырабатываемой мощностью, в максимальной мере увязать интересы гидроэнергетики и других водопользователей с учетом экологических требований. Водохранилища ГЭС позволяют перераспределить естественный суточный сток для обеспечения равномерного режима работы ГЭС с целью покрытия пиковой части графика нагрузок.

В условиях комплексного использования водохранилищ каскада ГЭС в значительной мере усложняются процессы управления ими в связи с необходимостью учета факторов их взаимодействия. При этом среди основных задач управления сложными гидроэнергетическими системами [1] необходимо выделить важный класс задач управления системой водохранилищ с целью поддержания в них оптимальных уровней воды в условиях нестационарного стока. От качества процессов управления уровнями воды в водохранилищах каскада в значительной мере зависит надежность и безопасность эксплуатации всей гидроэнергетической системы, а также возможность обеспечения надежного выполнения заданного графика выработки электроэнергии гидроэлектростанциями в условиях резких изменений уровня потребления вырабатываемой электрической мощности.

**Анализ состояния проблемы.** Различные подходы к решению задач автоматизированного управления гидроэнергетическими системами с каскадами водохранилищ рассматривались в работах [2,3]. При этом для решения задачи использовались традиционные методы синтеза многомерных регуляторов, обеспечивающие устойчивость замкнутой системы управления и заданное качество переходных процессов [4]. Особенностью рассматриваемых задач управления является наличие возмущений, обусловленных изменениями речного стока и существенно влияющих на качество процессов управления. Возникает необходимость в усовершенствовании методов автоматизированного управления уровнями с целью уменьшения степени влияния указанных возмущений.

В настоящей работе для решения задачи автоматизированного управления уровнями воды в системе водохранилищ в условиях нестационарного речного стока предлагается использовать метод синтеза многомерных селективно-инвариантных регуляторов, обеспечивающих компенсацию возмущений определенного класса [5].

**Постановка задачи синтеза регулятора.** Поскольку динамика изменения уровней воды в водохранилищах каскада определяются балансом притоков и расходов воды, в том числе неуправляемых стоков и утечек и управляемых водосбросов и расходов через гидротурбины, то с точки зрения теории автоматического управления каскад водохранилищ представляет собой многосвязный динамический объект управления, подверженный действию внешних возмущений. Рассмотрим математическую модель каскада водохранилищ ГЭС, состоящего из  $N$  резервуаров, расположенных последовательно по течению реки. Номер водохранилища определяется индексом  $i$ ,  $i = \overline{1, N}$ , причем наименьшее значение индекса соответствует водохранилищу, находящемуся ниже всех по течению. Структура каскада задается матрицей  $\Delta = \|\delta_{ij}\|$ ,  $i, j = \overline{1, N}$ , причем  $\delta_{ij} = 1$ , если  $j$ -тое водохранилище непосредственно связано с  $i$ -тым водохранилищем, находящимся ниже по течению реки, и  $\delta_{ij} = 0$  в противоположном случае.

При этом очевидно, что  $\delta_{ij} = 0$  для всех  $j < i$ .

Модель объекта управления в дискретно-временной форме при выбранном интервале выработки управляющих воздействий  $T_0$ , определяющем шаг управления, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 x_i(k+1) &= a_i x_i(k) - y_i(k) - v_i(k) + w_i(k) + \\
 &+ \sum_{j>i} \delta_{ij} b_{ij} [y_j(k - m_{ij}) + v_j(k - m_{ij})], \\
 y_i(k+1) &= y_i(k) + u_i(k), \quad i, j = \overline{1, N},
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где  $x_i(k)$  - текущий уровень воды в  $i$ -том водохранилище на  $k$  - том шаге процесса управления;

$w_i(k)$  - неуправляемые (в общем случае имеющие стохастический характер) притоки и расходы воды, связанные с  $i$ -тым водохранилищем;

$y_i(k)$  - текущее значение непосредственно управляемого расхода воды, в том числе и через гидротурбину  $i$ -того гидрогенератора;

$u_i(k)$  - управляющее воздействие, изменяющее расход воды;

$a_i$  - коэффициенты, учитывающие потери воды, связанные с испарением с водной поверхности и с фильтрацией из водохранилищ;

$b_{ij}$  - коэффициенты, описывающие потери воды вдоль русла реки между соответствующими водохранилищами;

$m_{ij}$  - количество шагов запаздывания, определяемое по расстоянию между соответствующими водохранилищами и средней скорости течения (время запаздывания выражается в единицах интервалов дискретизации по времени  $T_0$  и округляется до ближайшего целого)..

Вводя оператор запаздывания на один шаг, запишем уравнения объекта управления в следующем виде:

$$\begin{aligned} Q_i(q^{-1})x_i(k) &= q^{-2}u_i(k) + \sum_{j>i} \delta_{ij}b_jq^{-2-m_{ij}}u_j(k) + q^{-1}(1-q^{-1})f_i(k), \\ f_i(k) &= w_i(k) - v_i(k) + \sum_{j>i} \delta_{ij}b_jk^{-2-m_{ij}}v_j(k), \\ Q_i(q^{-1}) &= (1-q^{-1})(1-a_iq^{-1}), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $f_i(k)$  - эквивалентное стохастическое возмущение.

Переходя к векторно-матричным обозначениям, запишем (2) в виде:

$$\mathbf{Q}(q^{-1})\mathbf{X}(k) = q^{-2}\mathbf{P}_U(q^{-1})\mathbf{U}(k) + q^{-1}(1-q^{-1})\mathbf{F}(k), \quad (3)$$

где  $\mathbf{X}(k)$ ,  $\mathbf{U}(k)$ ,  $\mathbf{F}(k)$  - векторы-столбцы, составленные из компонент  $x_i(k)$ ,  $u_i(k)$ ,  $f_i(k)$  соответственно, а квадратные полиномиальные матрицы модели многомерного объекта размером  $N \times N$  определяются формулами:

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}(q^{-1}) &= \text{diag}\{Q_1(q^{-1}), \dots, Q_N(q^{-1})\}, \\ \mathbf{P}_U(q^{-1}) &= \begin{pmatrix} 1 & \delta_{12}b_2q^{-m_{12}} & \dots & \delta_{1N}b_Nq^{-m_{1N}} \\ 0 & 1 & \dots & \delta_{2N}b_Nq^{-m_{2N}} \\ & & \dots & \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (4)$$

Задача оптимального управления системой (3) состоит в нахождении последовательности векторов управлений  $\mathbf{U}(k)$  в функции измеряемых уровней воды в водохранилищах  $\mathbf{X}(k)$ , обеспечивающей их стабилизацию относительно заданного уровня  $\mathbf{X}^*$  с минимально возможной суммарной дисперсией обобщенной ошибки управления.

Зададим критерий качества процесса управления в виде:

$$J = \sum_{i=1}^N \mathbf{M} \left\{ [T_i^*(q^{-1})e_i(k)]^2 \right\} \rightarrow \min, \quad (4)$$

где  $e_i(k) = x_i^* - x_i(k)$  - текущие отклонения уровней от заданных постоянных значений  $x_i^*$ , имеющие смысл ошибок управления;

$T_i^*(q^{-1})$  - набор заданных (желаемых) характеристических полиномов, определяющих требуемые динамические свойства ошибок управления.

**Решение задачи синтеза многомерного селективно-инвариантного регулятора уровней воды.** В соответствии с общей методикой синтеза оптимальных регуляторов с внутренней моделью возмущения [5], выберем уравнение многомерного регулятора уровней в следующем виде:

$$\mathbf{R}(q^{-1})\mathbf{U}(k) = \mathbf{P}_X^*(q^{-1})\mathbf{X}^* - \mathbf{P}_X(q^{-1})\mathbf{X}(k) - \mathbf{P}_F(q^{-1})\widehat{\mathbf{F}}(k), \quad (5)$$

где  $\mathbf{R}(q^{-1})$ ,  $\mathbf{P}_X^*(q^{-1})$  - матричные полиномы от оператора сдвига, определяемые из условия обеспечения выполнения целевого условия (4);

$\mathbf{P}_F(q^{-1})$  - полином, выбираемый из условия компенсации возмущения;

$\widehat{\mathbf{F}}(k)$  - вектор косвенных измерений эквивалентного возмущения вида  $q^{-1}(1 - q^{-1})\mathbf{F}(k)$ , определяемых в свою очередь путем линейного динамического преобразования управляемых переменных (непосредственно измеряемых уровней) и управляющих воздействий:

$$\widehat{\mathbf{F}}(k) = \mathbf{Q}(q^{-1})\mathbf{X}(k) - q^{-2}\mathbf{P}_U(q^{-1})\mathbf{U}(k), \quad (6)$$

Отметим, что при этом косвенные измерения формируются с помощью статической двухходовой модели вида (6), что соответствует предложенной в [5] общей методике синтеза селективно-инвариантных систем управления.

В соответствии с [4] решение задачи синтеза многомерного дискретного регулятора, реализующего закон управления по отклонению, имеет следующий вид:

$$\mathbf{R}(q^{-1}) = \mathbf{S}(q^{-1})\mathbf{P}_U(q^{-1}), \quad \mathbf{P}_X^*(q^{-1}) = \mathbf{T}^*(q^{-1}), \quad \mathbf{P}_X(q^{-1}) = \mathbf{P}(q^{-1}), \quad (7)$$

При этом матричный полином  $\mathbf{P}_x^*(q^{-1})$  однозначно выражается через заданный желаемый характеристический полином замкнутой системы  $\mathbf{T}^*(q^{-1}) = \text{diag}(T_1^*(q^{-1}), \dots, T_N^*(q^{-1}))$ , а входящие в выражения для матричных параметров регулятора  $\mathbf{R}(q^{-1})$ ,  $\mathbf{P}_x(q^{-1})$  вспомогательные матричные полиномы  $\mathbf{S}(q^{-1}) = \text{diag}(S_1(q^{-1}), \dots, S_N(q^{-1}))$ ,  $\mathbf{P}(q^{-1}) = \text{diag}(P_1(q^{-1}), \dots, P_N(q^{-1}))$  в свою очередь определяются как решения полиномиальных уравнений:

$$Q_i(q^{-1})S_i(q^{-1}) + q^{-2}P_i(q^{-1}) = T_i^*, \quad \deg S_i(q^{-1}) = 2, \quad i = \overline{1, N}. \quad (8)$$

Решение указанных полиномиальных уравнений осуществляется стандартными методами, что позволяет в явном виде найти структуру и параметры многомерного регулятора уровней.

Для выбора полинома компенсации  $\mathbf{P}_F(q^{-1})$  необходимо задаться моделью стохастического возмущения  $\mathbf{F}(k)$ . Будем предполагать, что введенные эквивалентные возмущения, определяющие динамику стоков, описываются моделями дискретных случайных процессов  $f_i(k) = \bar{f}_i + \xi_i(k)$  с заданными постоянными средними значениями  $\bar{f}_i$  и стохастическими компонентами  $\xi_i(k)$  авторегрессионного вида:

$$\mathbf{D}(q^{-1})\xi_i(k) = \sigma_i^2 \eta_i(k), \quad i = \overline{1, N}, \quad (9)$$

где  $\eta_i(k)$  - дискретный белый шум с единичной дисперсией;

$\sigma_i^2$  - дисперсии компонент эквивалентных возмущений;

$D_i(q^{-1})$  - так называемые полиномы предсказания, определяющие структуру авторегрессионной модели стохастической компоненты возмущения  $[1 - q^{-2}D_i(q^{-1})]\xi_i(k) = \sigma_i^2 \eta_i(k)$ ,  $i = \overline{1, N}$ .

Указанные полиномы могут быть найдены путем решения вспомогательной задачи параметрической идентификации выбранной авторегрессионной модели возмущения по измеренным временным рядам величин стока с использованием известных алгоритмов оценивания параметров модели.

Выберем полином компенсации возмущения в структуре многомерного регулятора (5) в виде  $\mathbf{P}_F(q^{-1}) = \mathbf{S}(q^{-1}) \cdot \mathbf{D}(q^{-1})$ .

Тогда уравнение замкнутой системы управления уровнями с динамическим компенсатором возмущений, полученное относительно вектора ошибок управления  $\mathbf{E}(k)$  преобразуется к виду:

$$\mathbf{T}^*(q^{-1})\mathbf{E}(k) = q^{-1}(1 - q^{-1})\mathbf{N}(k), \quad \mathbf{N}(k) = \text{diag}(\sigma_1^2 \eta_1(k), \dots, \sigma_N^2 \eta_N(k)) \quad (10)$$

Поскольку дискретный объект управления (3) обладает астатизмом первого порядка, то для постоянных средних значений эквивалентных возмущений  $\bar{f}_i$  установившееся значение обусловленной ими составляющей ошибки управления равно нулю и вектор ошибок представляет собой векторный центрированный дискретный случайный процесс.

Таким образом, использование управления по косвенно измеряемым возмущениям путем введения в структуру многомерного регулятора внутренней модели возмущения позволяет путем снизить влияние случайных возмущений до уровня дискретного белого шума. При этом на основании формулы (10) известными методами анализа дискретных стохастических систем [4] можно вычислить оптимальное значение критерия (4) а также ковариационную матрицу вектора ошибок управления  $\mathbf{E}(k)$ , что позволяет выбрать вектор заданных значений уровней (уставок многомерного регулятора)  $\mathbf{X}^*$ , обеспечивающих допустимый уровень вероятности выхода текущих значений уровней воды в водохранилищах каскада за заданные допуски в соответствии с требованиями обеспечения надежности и безопасности функционирования гидроэнергетического комплекса.

**Выводы.** В работе обоснована возможность и показана эффективность применения теории синтеза оптимальных многомерных селективно-инвариантных регуляторов уровней воды в задачах управления каскадами водохранилищ и получены явные выражения для матричных параметров многомерных регуляторов уровней. Применение предложенной методики позволяет значительно снизить степень влияния возмущений, обусловленных влиянием изменения речного стока, и тем самым повысить надежность и безопасность функционирования каскада водохранилищ и качество процессов автоматизированного управления режимами работы гидроэнергетических комплексов с учетом гидрологических ограничений. дальнейшее развитие указанной методики связано с разработкой методов синтеза адаптивных селективно-инвариантных систем управления уровнями с идентификаторов возмущений в контуре управления [6].

**Список литературы:** 1. Цветков Е.В., Алябьева Т.М., Парфенов Л.Г. Оптимальные рабочие режимы гидроэлектростанций в электроэнергетических системах. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 265 с. 2. Turgeon A. Optimal operation of multi-reservoir power systems with stochastic inflows // Water Resources Research. - 1980. - Vol. 16 (2). - P. 275-283. 3. Glattfelder A., Huser L. Hydropower reservoir level control: a case study // **Automatica.** - 1993. - Vol. 29. - P. 1203-1214. 4. Изерман Р. Цифровые системы управления: Пер. с англ. - М.: Мир, 1984. - 541 с. 5. Цыпкин Я.З. Стохастические дискретные системы с внутренними моделями // Проблемы управления и информатики. 1996. № 1-2. - с. 21-26. 6 Цыпкин Я.З. Адаптивно инвариантные дискретные системы управления // Автоматика и телемеханика.- 1991.- , № 5.- с. 96-124.

Поступила в редколлегию 15.05.07



**В. П. СЕВЕРИН**, канд. техн. наук, **А.В. ЛЫМАРЬ**

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРОГЕНЕРАТОРА КАК ОБЪЕКТА РЕГУЛИРОВАНИЯ

Получена модель парогенератора в пространстве состояний в относительных координатах. Представлены принципиальная схема системы автоматического регулирования уровня парогенератора, в которой реализованы принципы регулирования по возмущению расхода пара и по отклонению регулируемого параметра уровня воды в парогенераторе.

The model of steam generator in conditions space in relative coordinates is. The basic scheme of system of automatic control of a level of a steam and gas generator in which principles of regulation on indignation steam consumption and on a deviation of adjustable parameter water level in steam generator are realized.

Отримана модель парогенератора у просторі станів у відносних координатах. Представлені принципова схема системи автоматичного регулювання рівня парогенератора, у якій реалізовані принципи регулювання по збурюванню витрат пару та по відхиленню регульованого параметра рівня води у парогенераторі.

**Введение.** Парогенератор (ПГ) ПГВ-1000 применяется в энергоблоках АЭС с реактором ВВЭР-1000 для производства водяного насыщенного пара. Актуальна задача оптимизации системы регулирования парогенератора. В существующих работах по моделированию паровых котлов, в которых ПГ рассматривается как динамический объект [1] отсутствуют значения параметров динамических моделей и не приводятся модели регуляторов.

**Постановка задачи.** Для исследования динамики ПГ и его системы регулирования необходимо построить их математические модели.

**Построение математической модели.** Математическая модель парогенератора должна включать кроме самого ПГ те звенья, через которые на ПГ подаются возмущающие и управляющие воздействия. Построим математическую модель ПГ как объекта регулирования.

Процессы теплопередачи [1, 2], материального и теплового баланса [3] и циркуляции пароводяной смеси [4] в ПГ представлены уравнениями:

$$\frac{d\theta_t}{dt} = a_n\theta_t + a_m\theta_m + b_{iq}q \quad (1)$$

$$\frac{d\theta_m}{dt} = a_m\theta_t + a_{mm}\theta_m + b_{mv}\theta_w \quad (2)$$

$$T_{ww} \frac{d\xi_w}{dt} + T_{wp} \frac{d\pi_p}{dt} = \beta_{wp}\pi_p + \alpha_{sk}\pi_k + \mu_w, \quad (3)$$

$$T_{pw} \frac{d\xi_w}{dt} + T_{pp} \frac{d\pi_p}{dt} = K_{pm}\theta_m + K_{pp}\pi_p - \mu_w, \quad (4)$$

$$T_{cp} \frac{d\pi_p}{dt} + T_{cc} \frac{d\xi_c}{dt} = g_a - \alpha_{sp}\pi_p + \alpha_{sk}\pi_k, \quad (5)$$

$$T_{aw} \frac{d\xi_w}{dt} + T_{ap} \frac{d\pi_p}{dt} + T_{ac} \frac{d\xi_c}{dt} + T_{aa} \frac{dg_a}{dt} = K_{aw}\xi_w + K_{ap}\pi_p + K_{ac}\xi_c - g_a \quad (6)$$

где (1) и (2) – уравнения теплопередачи, (3), (4) и (5) – уравнения баланса, (6) – уравнение циркуляции.

Решая систему уравнений (3) и (4) относительно производных относительных координат объема воды и давления по правилу Крамера, получим:

$$\frac{d\xi_w}{dt} = a_{wm}\theta_m + a_{wp}\pi_p + a_{wk}\pi_k + a_{wd}\mu_w, \quad (7)$$

$$\frac{d\pi_p}{dt} = a_{pm}\theta_m + a_{pp}\pi_p + a_{pk}\pi_k + a_{pd}\mu_w, \quad (8)$$

где

$$a_{wm} = \frac{\Delta_{wm}}{\Delta}, \quad a_{wp} = \frac{\Delta_{wp}}{\Delta}, \quad a_{wk} = \frac{\Delta_{wk}}{\Delta}, \quad a_{wd} = \frac{\Delta_{wd}}{\Delta}, \quad (9)$$

$$a_{pm} = \frac{\Delta_{pm}}{\Delta}, \quad a_{pp} = \frac{\Delta_{pp}}{\Delta}, \quad a_{pk} = \frac{\Delta_{pk}}{\Delta}, \quad a_{pd} = \frac{\Delta_{pd}}{\Delta}, \quad (10)$$

$$\Delta = T_{ww}T_{pp} - T_{wp}T_{pw}, \quad \Delta_{wm} = -T_{wp}K_{pm}, \quad \Delta_{wp} = T_{pp}\beta_{wp} - T_{wp}K_{pp}, \quad (11)$$

$$\Delta_{wk} = T_{pp}\alpha_{sk}, \quad \Delta_{wd} = T_{pp} + T_{wp}, \quad \Delta_{pm} = T_{ww}K_{pm}, \quad (12)$$

$$\Delta_{pp} = T_{ww}K_{pp} - T_{pw}\beta_{wp}, \quad \Delta_{pk} = -T_{pw}\alpha_{sk}, \quad \Delta_{pd} = -T_{ww} - T_{pw}. \quad (13)$$

Выразим производную координаты уровня из уравнения

$$T_{cp} \frac{d\pi_p}{dt} + T_{cc} \frac{d\xi_c}{dt} = g_a - \alpha_{sp}\pi_p + \alpha_{sk}\pi_k \quad (14)$$

с учетом (8):

$$\frac{d\xi_c}{dt} = a_{cm}\theta_m + a_{cp}\pi_p + a_{ca}g_a + a_{ck}\pi_k + a_{cd}\mu_w, \quad (15)$$

$$a_{cm} = -\frac{T_{cp}}{T_{cc}} a_{pm}, \quad a_{cp} = -\frac{\alpha_{sp} + T_{cp} a_{pp}}{T_{cc}}, \quad a_{ca} = \frac{1}{T_{cc}}, \quad (16)$$

$$a_{ck} = \frac{\alpha_{sk} - T_{cp} a_{pk}}{T_{cc}}, \quad a_{cd} = -\frac{T_{cp}}{T_{cc}} a_{pd}. \quad (17)$$

Выразим производную координаты расхода из уравнения

$$T_{aw} \frac{d\xi_w}{dt} + T_{ap} \frac{d\pi_p}{dt} + T_{ac} \frac{d\xi_c}{dt} + T_{aa} \frac{dg_a}{dt} = K_{aw}\xi_w + K_{ap}\pi_p + K_{ac}\xi_c - g_a \quad (18)$$

с учетом (7), (8) и (13):

$$\frac{dg_a}{dt} = a_{am}\theta_m + a_{aw}\xi_w + a_{ap}\pi_p + a_{ac}\xi_c + a_{aa}g_a + a_{ak}\pi_k + a_{ad}\mu_w, \quad (19)$$

где

$$a_{am} = -\frac{T_{aw}a_{wm} + T_{ap}a_{pm} + T_{ac}a_{cm}}{T_{aa}}, \quad a_{aw} = \frac{K_{aw}}{T_{aa}}, \quad (20)$$

$$a_{ap} = \frac{K_{ap} - T_{aw}a_{wp} - T_{ap}a_{pp} - T_{ac}a_{cp}}{T_{aa}}, \quad a_{ac} = \frac{K_{ac}}{T_{aa}}, \quad a_{aa} = -\frac{1 + T_{ac}a_{ca}}{T_{aa}}, \quad (21)$$

$$a_{ak} = -\frac{T_{aw}a_{wk} + T_{ap}a_{pk} + T_{ac}a_{ck}}{T_{aa}}, \quad a_{ad} = -\frac{T_{aw}a_{wd} + T_{ap}a_{pd} + T_{ac}a_{cd}}{T_{aa}} \quad (22)$$

Основное возмущающее воздействие подается на ПГ через следящий привод (СП), который перемещает клапан регулирования турбины (КРТ), изменяющий давление в главном паровом коллекторе (ГПК). Поэтому модель ПГ как объекта регулирования должна включать модели ГПК, СП и исполнительного механизма (ИМ) ГПК.

Дифференциальное уравнение ГПК после необходимых преобразований и ввода новых обозначений примем в виде

$$\frac{d\pi_k}{dt} = a_{kp}\pi_p + a_{kk}\pi_k + a_{ks}\mu_s, \quad (23)$$

где

$$a_{kp} = \frac{\alpha_{sp}}{T_{kk}}, \quad a_{kk} = \frac{\beta_{sk}}{T_{kk}}, \quad a_{ks} = -\frac{1}{T_{kk}}. \quad (24)$$

Модель привода КРТ примем в виде передаточной функции

$$W_s(s) = \frac{1}{T_{ss}s + 1}, \quad (25)$$

которой отвечает дифференциальное уравнение

$$\frac{d\mu_s}{dt} = a_{ss}\mu_s + b_{ss}u_s, \quad (26)$$

где  $u_s$  — управляющее воздействие на КРТ.

Исполнительный механизм РПК представим инерционным звеном первого порядка с передаточной функцией:

$$W_d(s) = \frac{1}{T_d s + 1}, \quad (27)$$

где  $T_d$  — постоянная времени привода. Передаточной функции отвечает дифференциальное уравнение

$$\frac{d\mu_w}{dt} = a_{dd}\mu_w + b_{dd}u, \quad (28)$$

где  $u$  — управляющее воздействие на РПК.

По уравнениям (7), (8), (7), (8), (15), (19), (23), (26) и (28) представим модель ПГ в пространстве состояний:

$$\frac{dX_G}{dt} = A_G X_G + B_{Gw}u + B_{Gq}q + B_{Gs}u_s, \quad \xi_c = C_G X_G, \quad (29)$$

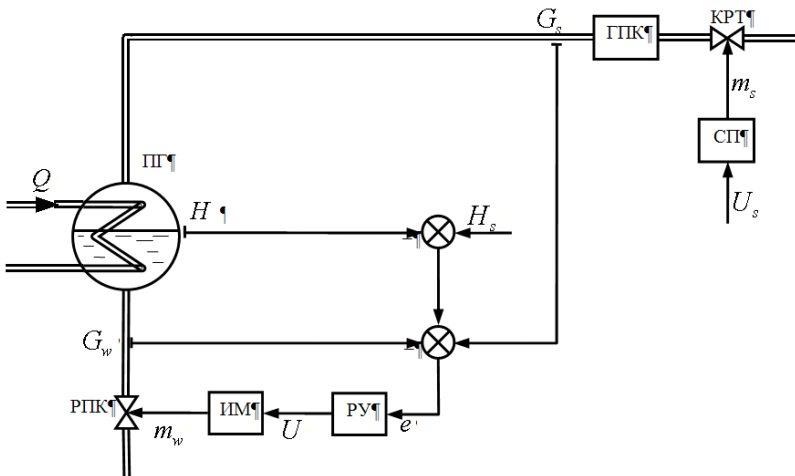
где

$$X_G = \begin{pmatrix} \theta_t \\ \theta_m \\ \xi_w \\ \pi_p \\ \xi_c \\ g_a \\ \pi_k \\ \mu_s \\ \mu_w \end{pmatrix}, \quad A_G = \begin{pmatrix} a_{tt} & a_{tm} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{mt} & a_{mm} & 0 & a_{mp} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{wm} & 0 & a_{wp} & 0 & 0 & a_{wk} & 0 & a_{wd} \\ 0 & a_{pm} & 0 & a_{pp} & 0 & 0 & a_{pk} & 0 & a_{pd} \\ 0 & a_{cm} & 0 & a_{cp} & 0 & a_{ca} & a_{ck} & 0 & a_{cd} \\ 0 & a_{am} & a_{aw} & a_{ap} & a_{ac} & a_{aa} & a_{ak} & 0 & a_{ad} \\ 0 & 0 & 0 & a_{kp} & 0 & 0 & a_{kk} & a_{ks} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{dd} \end{pmatrix}, \quad (30)$$

$$B_{G_w} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ b_{du} \end{pmatrix}, \quad B_{G_q} = \begin{pmatrix} b_{1q} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad B_{G_s} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ b_{ss} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad C_G = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}^T \quad (31)$$

Таким образом, динамическая модель ПГ как объекта регулирования представляет собой линейную систему динамических уравнений (СДУ) (29)–(31) в относительных переменных. Для номинального режима начальные условия СДУ нулевые. Входными величинами служат значение относительной координаты тепловой мощности теплоносителя  $q$  и значения управляющих воздействий на положения питательного  $u$  и расходного  $u_s$  регулирующих клапанов.

**Построение модели регулятора.** На основании модели ПГ построим математическую модель системы автоматического регулирования (САР) ПГ при различных законах регулирования.



Принципиальная схема САР уровня парогенератора

Принципиальная схема САР ПГ [2, 5] представлена на рисунке. Сигнал ошибки  $e$ , поступающий на вход регулятора уровня (РУ), формируется сигналом задатчика уровня  $H_s$  и импульсами с датчика уровня  $H$  и с датчиков расходов воды  $G_w$  и пара  $G_s$ . Сигнал РУ  $U$  действует на исполнительный механизм (ИМ), изменяющий координату  $m_w$  регулирующего клапана (РК). В установившемся режиме расход пара  $G_s$  равен расходу воды  $G_w$ , а уровень  $H$  равен заданному значению  $H_s$ . В САР реализованы принципы регулирования по возмущению  $G_s$  и по отклонению регулируемого параметра  $H$ . Входными возмущениями САР являются тепловая мощность теплоносителя  $Q$  и воздействие  $U_s$  на следящий привод.

Представим сигнал ошибки в относительных координатах:

$$\varepsilon = \xi_{cs} - \xi_c + g_s - g_w,$$

где  $\xi_c$  и  $\xi_{cs}$  — координата уровня и ее уставка,  $g_s$  и  $g_w$  — координаты расходов пара и воды. Перепишем выражение ошибки в виде

$$\varepsilon = \xi_{cs} - \xi_c - \beta_{wp}\pi_p - \alpha_{sk}\pi_k - \mu_w.$$

С использованием (30) имеем:

$$\varepsilon = \xi_{cs} - D_G X_G, \quad (32)$$

где

$$D_G = (0 \ 0 \ 0 \ \beta_{wp} \ 1 \ 0 \ \alpha_{sk} \ 0 \ 1). \quad (33)$$

**Выводы.** Построена модель парогенератора в пространстве состояний в относительных координатах. Представлены принципиальная схема системы автоматического регулирования уровня парогенератора, в которой реализованы принципы регулирования по возмущению расходом пара и по отклонению регулируемого параметра уровня воды в парогенераторе.

**Список литературы:** 1. Шифрин М. Ш. Автоматическое регулирование судовых паросиловых установок. — Л.: Судпромгиз, 1963. — 587 с. 2. Иванов В. А. Регулирование энергоблоков. — Л.: Машиностроение, 1982. — 312 с. 3. Парогенераторы реакторных установок ВВЭР для атомных электростанций / Б. И. Лукасевич, Н. Б. Трунов, Ю. Г. Драгунов, Давиденко С. Е. — М.: ИКЦ Академкнига, 2004. — 391 с. 4. Ривкин С. Л., Александров А. А. Термодинамические свойства воды и водяного пара. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 79 с. 5. Северин В. П., Никулина Е. Н. Математическое моделирование парогенератора атомного энергоблока // Вестник НТУ «ХПИ» «Системный анализ, управление и информационные технологии». — Харьков: НТУ «ХПИ». — 2006. — №. 5 — С. 25–30

Поступила в редколлегию 05.03.01

**В. П. СЕВЕРИН**, канд. техн. наук,  
**В. А. КЛИМЧУК**, студент НТУ «ХПИ»

## **АНАЛИЗ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ**

Розглянуті питання оптимізації електрогідравлічних систем автоматичного регулювання парової турбіни К-1000-60/1500. Наведені математичні моделі системи регулювання частоти обертання. Означені динамічні показники якості системи регулювання та запропоновано схему оптимізації цих показників з використанням методів векторної оптимізації.

Рассмотрены вопросы оптимизации электрогидравлических систем регулирования паровой турбины К-1000-60/1500. Приведены модели системы регулирования частоты вращения. Определены динамические показатели качества системы регулирования и предложена схема оптимизации этих показателей с использованием методов векторной оптимизации.

In the article there have been reviewed questions of optimization electro hydraulic control system of steam turbine К-1000-60/1500. There have been proposed mathematical models of rotation frequency control system, have been specified dynamic quality indexes and proposed a plan of optimization these indexes using vector optimization methods.

**Введение.** С ростом сложности задач, возникающих в процессе производства электроэнергии, к эффективности систем автоматического регулирования (САР) паровых турбин АЭС предъявляются повышенные требования. Так, степень нечувствительности регулирования турбин по частоте вращения не должна превышать 0,06%, а величина динамического заброса частоты вращения при полных сбросах нагрузки — 10% от номинальной частоты [1].

В этой работе рассматривается паровая турбина К-1000-60/1500 [2], используемая в атомных энергоблоках ВВЭР-1000. Турбина оснащена собственной электрогидравлической системой регулирования (ЭГСП). Целью статьи является рассмотрение вопросов, связанных с оптимизацией САР паровой турбины по ее динамическим критериям качества. Рассматривается способ синтеза САР путем решения задач оптимизации ее прямых показателей качества с применением методов векторной оптимизации (ВО).

**Модели систем.** На рис. 1 представлена структурная схема ЭГСП паровой турбины для режима регулирования частоты вращения турбогенератора [1], которая включает электрогидравлический следящий привод (ЭГСП), паровой тракт турбины (ПТ), ротор турбины (РТ), регулятор частоты (РЧ). На схеме обозначены возмущение  $v = 1(t)$ , регулируемая относительная частота  $\varphi$ , задание частоты  $\varphi_0 = 0$ , ошибка  $e$ , управляющий сигнал РЧ  $u$ .

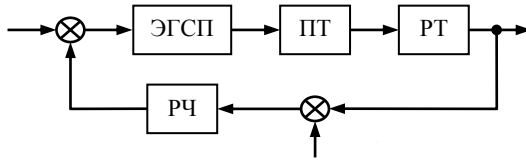


Рис. 1. Структурная схема ЭГСП

Структурная схема ЭГСП на рис. 2 включает электрогидравлический преобразователь (ЭГП), золотник сервомотора высокого давления (ЗСВД), сервомотор высокого давления (СВД), датчики (Д), коэффициенты обратных связей с найденными ранее оптимальными значениями  $k_1 = 0,39$ ,  $k_2 = 0,28$ , входной и выходной сигналы  $w$  и  $y$ .

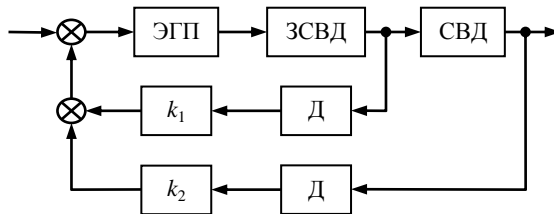


Рис. 2. Структурная схема ЭГСП

Для решения задач оптимизации получены математические модели ЭГСП и ее составных частей.

Математическая модель ЭГСП и ее звеньев, представленная в виде дифференциальных уравнений:

$$dX/dt = A \cdot X + B \cdot u, \quad y = C \cdot X$$

с матрицами ЭГП, ЗСВД, СВД, Д, ПТ и РТ [3]:

$$A_s = \begin{pmatrix} -667 & -667 & 0 & 0 & 0 \\ 200 & -9,8 & -338 & 70 & 138 \\ 0 & 83 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 337 & -337 & -337 \\ 0 & 0 & 0 & 114 & 0 \end{pmatrix}, \quad B_s = \begin{pmatrix} 667 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad C_s = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}^T,$$

$$A_d = \begin{pmatrix} -349 & 0 \\ 43 & 0 \end{pmatrix}, \quad B_d = \begin{pmatrix} 349 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad C_d = (0 \ 1), \quad A_c = 0, \quad B_c = 9,3, \quad C_c = 1,$$

$$A_d = \begin{pmatrix} -1333 & -1333 \\ 500 & 0 \end{pmatrix}, \quad B_d = \begin{pmatrix} 1333 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad C_d = (0 \ 1),$$



$$A_{II} = \begin{pmatrix} -3,4 & 0,687 & 0 & 0 \\ 0,079 & -9,41 & 9,2 & 0 \\ 0 & 38,24 & -39,18 & 0,526 \\ 0 & 0 & 0,839 & -2,74 \end{pmatrix}, \quad B_{II} = \begin{pmatrix} 2,96 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad C_{II} = \begin{pmatrix} 0,372 \\ -0,074 \\ 1,378 \\ 7,747 \end{pmatrix}^T,$$

$$A_p = -0,139, \quad B_p = 0,0694, \quad C_p = 1.$$

Для той же ЭГСР и ее звеньев существуют математические модели в виде передаточных функций:

$$W(s) = \frac{\beta(s)}{\alpha(s)}, \quad \alpha(s) = \sum_{i=0}^n \alpha_i \cdot s^{n-i}, \quad \beta(s) = \sum_{i=0}^m \beta_i \cdot s^{m-i}, \quad (1)$$

где  $s$  — переменная Лапласа. Обозначим векторы коэффициентов знаменателя и числителя ПФ через  $\alpha = (\alpha_0, \dots, \alpha_n)$  и  $\beta = (\beta_0, \dots, \beta_m)$ . Значения этих векторов для звеньев ЭГСР получены в результате идентификации их параметров по экспериментальным характеристикам [4].

ПФ ЭГП 5-го порядка вида (1) с коэффициентами  $\alpha = (1, 1054, 4,66 \cdot 105, 1,09 \cdot 108, 1,23 \cdot 1010, 4,76 \cdot 1011)$ ,  $\beta = 4,76 \cdot 1011$ . ПФ золотника —  $\alpha = (1, 43,3, 1,51 \cdot 104)$ ,  $\beta = 1,51 \cdot 104$ . ПФ сервомотора —  $\alpha = (1, 0)$ ,  $\beta = 9,30$ . ПФ датчика —  $\alpha = (1, 1333, 6,67 \cdot 105)$ ,  $\beta = 6,67 \cdot 105$ . ПФ ЭГСП имеет векторы коэффициентов  $\alpha = (1, 4069, 7,68 \cdot 106, 8,63 \cdot 109, 6,31 \cdot 1012, 3,09 \cdot 1015, 1,02 \cdot 1018, 2,25 \cdot 1020, 3,14 \cdot 1022, 2,42 \cdot 1024, 7,62 \cdot 1025, 1,24 \cdot 1027, 8,32 \cdot 1027)$ ,  $\beta = (1,87 \cdot 1016, 4,99 \cdot 1019, 5,82 \cdot 1022, 3,33 \cdot 1025, 8,32 \cdot 1027)$ . ПФ ПТ:  $\alpha = (1, 54,83 \cdot 325,3 \cdot 106, 552,6 \cdot 109, 142)$ ,  $\beta = (1,132, 57,95, 181,8, 142)$ . ПФ РТ:  $\alpha = (1, 0,139)$ ,  $\beta = 0,0694$ .

Полная модель ЭГСР зависит от того, какой закон регулирования реализует регулятор частоты вращения.

Для анализа и оптимизации САР паровой турбины К-1000-60/1500 следует разработать математические модели ЭГСР с разными типами регуляторов, реализующими разные законы управления. Предпочтение следует отдать моделям в пространстве состояния, так как они менее требовательны к вычислительным ресурсам и менее подвержены ошибкам по сравнению с моделями в виде ПФ.

При оптимизации САР варьируемыми параметрами модели будут являться параметры регуляторов. Изменяя значения этих параметров, следует найти такие их значения, которым соответствовало бы наилучшее качество работы рассматриваемой САР.

Будем рассматривать различные регуляторы, составленные из пропорционального (П), интегрального (И) и дифференциального (Д) регуляторов. П регулятор формирует пропорциональный закон управления:  $u_p = K_p \cdot \varepsilon$ . И и Д регуляторы формируют интегральный и

дифференциальный законы:  $u_I = \frac{1}{T_I} \int \varepsilon dt$ ,  $u_D = \tau_D \frac{d\varepsilon}{dt}$ . Здесь  $K_p$ ,  $T_I$  и  $\tau_D$  —

параметры регуляторов. Данным П, И и реализуемому Д законам управления соответствуют передаточные функции регуляторов:

$$W_P = K_P, W_I(s) = \frac{1}{T_I \cdot s}, W_D(s) = \frac{K_D T_D s}{T_D s + 1}.$$

Последняя передаточная функция при  $K_D > 1$  приближенно формирует дифференциальный закон с параметром  $\tau_D = K_D T_D$ . Обозначая  $\lambda_I = 1/T_I$ ,

$$\tau_D = K_D T_D, \text{ запишем дифференциальное уравнение И регулятора } \frac{du_I}{dt} = \lambda_I \varepsilon$$

и уравнения Д регулятора  $\frac{dv_D}{dt} = -\lambda_D (v_D + K_D \varepsilon), u_D = v_D + K_D \varepsilon$ . Таким образом, варьируемыми параметрами будут являться  $K_P, \lambda_I$  и  $\lambda_D$ .

Для ЭГСР паровой турбины требуют своего дальнейшего развития вопросы, связанные с динамическими критериями качества работы САР, с более широким использованием прямых показателей качества. Прямыми показателями качества САР являются перерегулирование, колебательность и время регулирования выходной координаты  $y(t)$  при ступенчатом входном воздействии  $u(t) = 1(t)$  [5]. Также для САР паровой турбины важнейшим показателем является максимальное отклонение от установившегося значения  $y(\infty)$  — перерегулирование  $\sigma$ , которое не должно превышать  $\sigma_m$  от установившегося значения. Показатель колебательности  $\zeta$  определяется по амплитудам колебаний  $y(t)$  относительно установившегося значения  $y(\infty) = 0$  как отношение третьей амплитуды к первой, в противном случае — как отношение второй амплитуды к первой. Этот показатель не должен превышать значения  $\zeta_m$ . Третий показатель — время регулирования  $\tau$ , которое определяется моментом попадания  $y(t)$  в заданный интервал  $[y(\infty)(1 - \delta_y), y(\infty)(1 + \delta_y)]$ .

**Задачи оптимизации.** Если считать, что прямые показатели качества САР являются функциями вектора  $x$  варьируемых параметров ее модели, то задача оптимизации САР — это задача нелинейного программирования (НП):

$$a_i \leq x_i \leq b_i, i = \overline{1, p}, \sigma(x) \leq \sigma_m, \zeta(x) \leq \zeta_m, \tau(x) \rightarrow \min.$$

Учитывая высокий порядок моделей САР, предлагается для решения этой задачи применять методы векторной оптимизации по указанным критериям качества, а для сокращения времени, которое требуется для работы алгоритмов численного интегрирования, можно также применить также

косвенный показатель качества — интегральную квадратичную оценку (ИКО) [5]:

$$J(x) = \int_0^{\infty} [e(t)]^2 dt, e(t) = z + \sum_{i=1}^l w_i \cdot z^{(i)}.$$

Удобство ИКО в том, что она дает единый критерий качества, характеризующий быстроту затухания и перерегулирование переходного процесса в совокупности, без определения того и другого в отдельности. При этом задача сводится к минимизации ИКО

$$a_i \leq x_i \leq b_i, J(x) \rightarrow \min.$$

Таким образом, с привлечением современных методов интегрирования и оптимизации возможно решить математические задачи синтеза ЭГСР по прямым показателям качества и ИКО, если свести эти задачи к моделям ВО.

Пусть  $x = (x_1, x_2, \dots, x_p) \in R^p$  — вектор варьируемых параметров. Постановка задачи НП с ограниченной областью определения целевой функции имеет вид:

$$\min_{x \in D} f(x), D = \{x \mid g_k(x) \leq 0, k = \overline{1, m}\} \subset R^p.$$

Здесь  $f(x)$  — целевая функция,  $D$  — область определения функции,  $g_k(x)$  — функции ограничений. Функция ВО для этой задачи имеет вид:

$$F(x) = \begin{cases} (i-1, g_i(x)), & \exists i = \min \{k \mid g_k(x) > 0, k = \overline{1, m}\}, \\ (m, f(x)), & g_k(x) \leq 0, k = \overline{1, m}. \end{cases} \quad (2)$$

Эта двумерная вектор-функция определена для любой точки пространства параметров. Для сравнения ее произвольных значений  $p$  и  $q$  сопоставим ей бинарную операцию «лучше»  $\prec$ :

$$p \prec q = \begin{cases} 1, & p_1 > q_1 \vee p_1 = q_1 \wedge p_2 < q_2, \\ 0, & p_1 < q_1 \vee p_1 = q_1 \wedge p_2 \geq q_2. \end{cases}$$

Рассмотрим общую задачу ВО с векторной функцией  $f(x) = (f_1(x), \dots, f_m(x))$  при убывании приоритета в области, заданной ограничением  $g(x) \leq 0$ . На первые  $m-1$  критериев наложим ограничения  $f_k(x) \leq C_k, k = \overline{1, m-1}$ . Постановка задачи ВО имеет вид:

$$\min_{x \in D} f_m(x), D = \{x \mid g(x) \leq 0, f_k(x) \leq C_k, k = \overline{1, m-1}\} \subset R^p. \quad (3)$$

Функция ВО этой задачи имеет вид:

$$F(x) = \begin{pmatrix} \max\{g(x), 0\} \\ \max\{f_1(x) - C_1, 0\} \\ \dots \\ \max\{f_{m-1}(x) - C_{m-1}, 0\} \\ f_m(x) \end{pmatrix}.$$

Здесь первые  $m$  проекций — это штрафные функции типа срезки. Для сравнения двух значений  $p$  и  $q$  этой функции ВО сопоставим ей бинарную

$$\text{операцию } \prec: p \prec q = \begin{cases} 1, & p_j < q_j \\ 0, & p_j \geq q_j \end{cases}, \quad j = \begin{cases} i, & \exists i = \min\{k \mid p_k \neq q_k, k = \overline{1, m}\} \\ m, & p_k = q_k, k = \overline{1, m}. \end{cases}$$

Задаче ВО (3) можно также сопоставить двумерную функцию ВО (2), если положить:  $g_1(x) = g(x)$ ,  $g_k(x) = f_{k-1}(x) - C_{k-1}$ ,  $k = \overline{2, m}$ ,  $f(x) = f_m(x)$ .

В зависимости от постановок задач оптимизации возможны и другие функции ВО.

**Заключение.** Таким образом, проанализировав задачи оптимизации ЭГСР паровой турбины К-1000-60/1500, можно сделать вывод, что для этих целей можно успешно использовать векторные модели сведения задач оптимизации САР паровой турбины к задачам оптимизации ее прямых показателей качества с использованием методов векторной оптимизации. При этом предполагается использовать приведенные выше модели ЭГСР в пространстве состояний, решив предварительно круг задач, связанных с созданием новых моделей с различными типами регуляторов, реализующий разные законы управления.

Предложенная методика векторной оптимизации может применяться и для других сложных технических систем.

**Список литературы:** 1. Веллер В. Н. Автоматическое регулирование паровых турбин. — М.: Энергия, 1977. — 406 с. 2. Рохленко В.Ю., Гладкий П. М., Бабеев И. Н. Исследование динамических свойств контура управления паровой турбины с электрогидравлической системой управления // Промышленная энергетика. 1998. № 1. — С. 11-15 3. Северин В. П. Многокритериальный синтез технических систем методами векторной оптимизации // Високі технології в машинобудуванні. Збірник наукових праць НТУ «ХП». — Харків: НТУ «ХП». — 2002. — Вип. 1 (5). — С. 351–355. 4. Северин В. П., Головня М.Н., Петрашев С.Н. Моделирование, идентификация и оптимизация электрогидравлического следящего привода // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика: — Харьков: ХГПУ, 1994. С. 31-33. 5. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975. 768 с. 6. Северин В. П. Векторная оптимизация динамических показателей качества системы управления энергоблоком АЭС // Техн. электродинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність». — 2002. — Ч. 1. — С. 111–116

Поступила в редколлегию 28.03.07

*Т.В. КАДАЧ*, преподаватель БНТУ (г. Минск, Беларусь)

## **ОПЕРАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ТРУБЧАТЫХ ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ И МЕТОДЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ВЫБОРЕ РЕЖИМОВ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

У статті розглядаються операційна модель трубчастих повітрепідігрівників і методика пошуку їх раціональних режимних параметрів за допомогою розробленої діалогової системи підтримки прийняття рішень DMS. Наводиться приклад практичного застосування системи.

В статье рассматриваются операционная модель трубчатых воздухоподогревателей и методика поиска их рациональных режимных параметров с помощью разработанной диалоговой системы поддержки принятия решений DMS. Приведен пример практического применения системы.

In the article the operational model of tubular air heaters is considered and the search principles of its rational operating parameters, with the help of developed dialogue decision-making support system DMS, is described. The practical example of system implementation is given.

**Введение.** Трубчатые воздухоподогреватели (ТВП) являются одним из основных узлов современных паровых котлов и предназначены для подогрева воздуха для сжигания топлива за счет охлаждения уходящих дымовых газов.

Проектирование воздухоподогревателей, как и других элементов энергетических котлоагрегатов, представляет собой сложный трудоемкий процесс, связанный с обработкой больших объемов информации и с выполнением различного вида расчетов. Традиционно проектирование воздухоподогревателей базируется на нормативных методах [1, 2], содержащих методические указания и справочные материалы для выполнения проверочного и конструктивного тепловых и аэродинамических расчетов стационарных котельных агрегатов.

В настоящее время для выполнения наиболее трудоемких нормативных расчетов используется ЭВМ. Существует много версий указанных выше методов ([3, 4, 5, 6, 7] и др.), разработанных как в различных вузах на теплоэнергетических специальностях, так и на котлостроительных заводах, в научно-исследовательских и проектных организациях. Однако в данных работах слабо отражены подходы, связанные с поиском рациональных параметров узлов паровых котлов, что, вероятно, вызвано сложностью построения адекватных математических моделей, трудностями, возникающими при подготовке исходных данных для оптимизационных задач и использовании полученных результатов в процессах проектирования.

Преодоление этих проблем возможно при внедрении специальных технологий автоматизированного проектирования, включающих в себя соответствующие оптимизационные модели, эффективные методы решения и необходимое программное обеспечение. Пользователю должны быть

предоставлены удобные средства подготовки исходных данных, управления параметрами модели и процессом решения оптимизационных задач, проведения анализа полученных результатов.

**Постановка задачи.** Исследование режимов работы воздухоподогревателей уже имеющихся котельных агрегатов, когда известны конструкция и параметры ТВП, и необходимо подобрать рациональный режим его работы, представляется актуальным для современных ТЭС.

В данном случае целесообразно применить подход, связанный с математическим моделированием режимов работы ТВП, анализом модели и сведением исходной задачи выбора технологических параметров к задаче принятия решения в условиях многокритериальности.

### **Операционная модель ТВП**

В рассматриваемой задаче в качестве оптимизируемых были приняты полученные в результате исследования наиболее влияющие на показатели функционирования ТВП параметры:

- температура воздуха на входе,  $^{\circ}\text{C} - t'_{ВП}$ ;
- температура газов на входе,  $^{\circ}\text{C} - g'_2$ ;
- скорость воздуха и газов, м/с –  $w_g$  и  $w_g$ ;
- температура стенки трубки,  $^{\circ}\text{C} - t_{cm}$ ;
- коэффициент избытка воздуха за пароперегревателем –  $\alpha''_{mn}$ ;
- относительная нагрузка котла –  $\bar{D}$ .

Исходными данными при проектировании, определяющими вектор являются:

- характеристики парового котла (температура питательной воды,  $^{\circ}\text{C} - t_{ne}$ , расчетный расход топлива, кг/час –  $B_p$ );
- состав и характеристики топлива (теплотворная способность топлива, ккал/м<sup>3</sup> –  $Q''_n$ , серосодержание топлива  $S^p$ , объемы и энтальпии воздуха и продуктов сгорания).

Физические параметры воздуха и дымовых газов находились по интерполяционным полиномам, приведенных в [2].

- коэффициенты и критерии, необходимые для расчета теплообмена в ТВП (критерий физических свойств (Прандтля) –  $Pr$ ; коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с –  $\nu$ ; коэффициент теплопроводности, Вт/м<sup>2</sup> –  $\lambda$ ; коэффициент теплопроводности слоя отложений, Вт/м<sup>2</sup> –  $\lambda_{oml}$ ; критерий Рейнольдса –  $Re$ ; коэффициент тепловой эффективности –  $\psi$ ; коэффициент использования –  $\zeta$  и др.).

Эти параметры были описаны согласно номограммам, графикам и таблицам, рекомендуемым в [2].

- конструктивные и тепловые характеристики ТВП (число рядов труб по ходу воздуха и газов, шт, –  $z_1$  и  $z_2$ , количество ходов по воздуху, шт –  $m$ ; толщина стенки и диаметр трубки, м, –  $\delta$  и  $d$ ; поперечный и продольный шаги труб, м –  $s_1$  и  $s_2$ ; длина трубки, м –  $l$ ; толщина верхней и нижней трубных досок, м –  $\delta_{np}$ , температура воздуха на выходе, °C, –  $t''_{ВП}$ );

В качестве критериев оптимальности в данной задаче были выбраны:

- коэффициент теплопередачи

$$k = f(d, \delta, w_g, w_z, t'_{ВП}, t''_{ВП}, \mathcal{G}', z_1, z_2, s_1, s_2, l, Pr, \nu, \lambda, \xi, \alpha''_m) \rightarrow \max; \quad (1)$$

- температурный напор

$$\Delta t = f(\psi, t'_{ВП}, t''_{ВП}, \mathcal{G}') \rightarrow \max \quad (2)$$

- скорость низкотемпературной коррозии

$$C_k = f(t'_{ВП}, d, w_g, w_z, z_2, s_1, s_2, \bar{D}, \alpha''_m, t_{cm}, S^p) \rightarrow \min \quad (3)$$

Полученное решение должно удовлетворять следующим техническим ограничениям:

1. Параметрическим ограничениям, которые задаются, исходя из опыта эксплуатации определенного воздухоподогревателя, и описываются диапазонами

$$x_{i\min} \leq x_i \leq x_{i\max}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (4)$$

где  $x_{i\min}$ ,  $x_{i\max}$  – соответственно минимальное и максимальное значения оптимизируемого параметра  $X_i$ .

2. Функциональным ограничениям:

- по аэродинамическому сопротивлению  $\xi_{\Sigma}$ , описываемому выражением

$$\xi_{\Sigma} = \xi_{np} + \Delta h_{изм} \leq \xi_{режим}, \quad (5)$$

где  $\xi_{np}$  – сопротивление трения, приведенное в [1];

$\Delta h_{изм}$  – сопротивление вследствие изменения скоростей при входе и выходе [1];

$\xi_{режим}$  – значение сопротивления, допустимого согласно режимной карте парового котла.

- по температуре уходящих газов

$$g_{yx} = f(t'_{ВП}, \text{тип топлива}) \leq g_{yx\_режим}, \quad (6)$$

где  $g_{yx\_режим}$  – значение температуры уходящих газов, допустимого согласно режимной карте парового котла.

Анализ математических моделей ТВП, детально рассмотренных в [8], показал, что

- при поиске режимных параметров возникают оптимизационные задачи различной сложности: от простых однокритериальных до более сложных многокритериальных;
- зависимости целевых функций и функциональных ограничений являются комбинациями степенных показательных и логарифмических функций от вектора искомых параметров; а в случае использования в моделях программных продуктов, реализующих методы конечных элементов, являются алгоритмически заданными;
- наличие значительного количества параметров и критериев.

Рассмотрев существующие программные средства, занимающиеся проблемами моделирования и оптимизации технических объектов, автор пришла к заключению, что исследованные пакеты программ и системы не обладают в достаточной степени необходимыми функциями для обеспечения комплексного решения всего множества задач, возникающих при поиске режимных параметров ТВП.

**Методика принятия решений.** Для решения задач, обеспечивающих принятие качественных рациональных решений, при проектировании и эксплуатации элементов паровых котлов, была разработана диалоговая система DMS (Decision Making System), базирующаяся на основных принципах системного анализа. Для рассматриваемой задачи система обеспечивает выработку рекомендаций проектировщику значений режимных параметров проектируемых ТВП, в предположении, что структурная схема воздухоподогревателя уже определена и предполагаются также известными желательные режимы работы ТВП исходя из функциональных требований парового котла в целом.

Система может работать с воздухоподогревателями различных структур: как одноступенчатых, так и двухступенчатых, с разным количеством потоков и ходов для прохода воздуха, с шахматным или коридорным расположением труб, работающих на твердом, жидком или газообразном топливе.

Система предусматривает расчет тепловых и аэродинамических процессов, проходящих в ТВП, на основе нормативных методов [1, 2]. Однако реализована возможность подключения других расчетных методик, в том числе основанных на конечно-элементных методах, реализованных в современных САЕ-пакетах.



Описанная выше математическая модель была реализована в виде отдельного программного модуля, который подключается и обрабатывается системой.

Так как условия работы ТВП могут быть охарактеризованы большим числом режимных параметров (до нескольких десятков), то применение таких методов анализа влияния параметров на целевые функции как анализ чувствительности, корреляционный анализ, метод случайного баланса позволили снизить размерность приведенной выше операционной модели воздухоподогревателя в зависимости от требуемой точности решения задачи до семи.

Ряд функциональных ограничений и критериев, описывающих воздухоподогреватели, может быть описан достаточно сложными алгоритмическими зависимостями, что серьезно усложняет процесс поиска решения. Поэтому целесообразно на предварительных этапах поиска отыскивать приближенные решения с помощью упрощенных аналитических выражений, полученных в результате применения следующих методов с соответствующей проверкой на адекватность:

1. Для работы с зависимостями, представленными линейными выражениями: вычислительный эксперимент вида ПФЭ  $2^n$  и множественный регрессионный анализ;

2. Для работы с зависимостями, представленными нелинейными выражениями: вычислительный эксперимент на базе планов 2-го порядка (ОЦКП) и множественный нелинейный регрессионный анализ;

3. Для работы с зависимостями, представленными выражениями произвольной формы: идентификация параметров модели с введением вида уравнения.

Предварительный поиск решения и его анализ на модели ТВП с полученными упрощенными зависимостями позволил сузить область поиска за счет уменьшения параметрических ограничений (4) и дал возможность более точно определить окончательное решение.

В случаях, когда требовалось участие эксперта-теплоэнергетика в процессе оптимизационного исследования (например, если необходимо было оценить информативность оптимизируемых параметров ТВП, назначить критериальные ограничения для построения допустимого множества или установить приоритет между критериями оптимальности на этапе выбора окончательного решения и т.д.), система позволила воспользоваться разработанными для этих целей методами экспертных оценок (взвешивания экспертных оценок с учетом компетентности экспертов, последовательных сопоставлений или методом ранга).

Так как в процессе поиска рациональных режимных параметров ТВП возникают как однокритериальные, так и многокритериальные задачи поиска решений, то в системе были разработаны соответствующие модули. Схема поиска решения, реализованная в модуле многокритериальной оптимизации использует подход, предложенный в [9], и включает следующие шаги:

- проведение испытаний;
- построение и отображение неупорядоченной, упорядоченной и нормированной таблиц испытаний;
- обработка критериальных ограничений, введенных пользователем;
- построение и отображение допустимого множества;
- построение и отображение паретовского множества;
- нахождение окончательного решения с помощью формальных или неформальных методов.

Для проведения испытаний в модуле применяется метод Монте-Карло с использованием датчика случайных чисел с повышенной равномерностью, основанный на ЛРτ-последовательности [9].

Для решения задачи в однокритериальной постановке предусмотрены:

- поиск решения с помощью глобальных методов оптимизации: метода сеток, метода Монте-Карло, эволюционного бионического алгоритма;
- локальный поиск с использованием методов случайного поиска с линейной и нелинейной тактикой и метода Хука-Дживса;
- совместная работа метода Монте-Карло и локальных методов (набросовый алгоритм).

Качество функционирования ТВП, оцениваемое набором числовых характеристик, должно быть сохранено в некоторой области оптимизируемых параметров  $\bar{X}$ . При синтезе ТВП возникает вопрос, насколько реальные значения выбранных критериев оптимальности будут соответствовать полученным в процессе поиска решениям в силу неустраняемой неточности математической модели. В связи с этим необходимо дать оценку устойчивости найденного решения. В системе DMS используется понятие практической устойчивости сложных систем [10], где под устойчивостью подразумевается сохранение некоторого свойства функционирования системы (критерия оптимальности) по отношению к неопределенности некоторых ее параметров.

Принятие решений с помощью разработанной системы может осуществляться как в комплексной постановке, так и при решении каких-либо частных задач исследования модели или поиска решения.

**Применение системы.** Система DMS была использована для поиска режимных параметров ТВП и подтвердила свою эффективность. В частности при поиске режимов работы воздухоподогревателя парового котла ТП-87 решались следующие задачи:

- исследовались вопросы информативности параметров воздухоподогревателя;
- поиск рациональных режимных параметров ТВП в условиях многокритериальности.

Для решения задачи выбора режимов работы ТВП по совокупности критериев был использован модуль многокритериальной оптимизации, реализованный в системе DMS.

Система генерирует проектные решения с учетом заданных параметрических и функциональных ограничений и далее, если проектировщик может задать приоритет критериев оптимальности и/или вид их функций полезности, то строится обобщенный аддитивный критерий, и затем решается одно-критериальная задача методами поисковой оптимизации нулевого порядка.

В противном случае множество решений сужается до области Парето, и окончательное решение определяется с помощью библиотеки формальных алгоритмов выбора.

Задача выбора окончательного решения режимов ТВП решалась для двух случаев:

1. Использовался формальный метод поиска решения, ближайшего к идеальной точке.
2. Использовался метод построения аддитивного критерия с учетом описанных далее предпочтений проектировщика.

Наиболее важным из критериев была выбрана скорость низкотемпературной коррозии  $C_k$  с указанием веса, равным 10. Для описания функции полезности, описывающей  $C_k$ , был выбран график, при котором незначительное отклонение от лучшего значения является критичным.

Коэффициенту теплопередачи  $k$  был назначен вес, равный 5 и линейный вид функции полезности, означающий допущение постепенного ухудшения характеристик критерия.

Критерию температурный напор  $\Delta t$  был назначен вес, равный 2 и был выбран вид функции полезности, при котором даже значительное отклонение от лучшего значения является некритичным.

В табл. 1 приведены полученные значения критериев оптимальности. Для базового варианта значения рассчитаны с использованием нормативных методов [1, 2], а для проектного варианта приведены значения для двух случаев поиска окончательного решения, описанных выше.

Таблица 1

Значения критериев оптимальности

Критерии		Базовый вариант	Проектный вариант	
			1	2
1	коэффициент теплопередачи $k$	14,4	14,3	14,54
2	скорость коррозии $C_k$	0,35	0,16	0,08
3	температурный напор $\Delta t$	60,5	65,61	61,16

Приведенные в табл. 1 значения критериев оптимальности были получены при следующих значениях оптимизируемых параметров (табл. 2).

Значения оптимизируемых параметров

Значения оптимизируемых параметров		Базовый вариант	Проектный вариант	
			1	2
1	температура воздуха на входе $t'_{ВП}$	80	70	76
2	температура газов на входе $g'_2$	287	291	287
3	скорость воздуха $w_6$	6,2	6,24	6,92
4	скорость газов $w_2$	9,7	9,46	9,36
5	температура стенки трубки $t_{cm}$	105	148	146
6	коэффициент избытка воздуха за пароперегревателем $\alpha''_{nn}$	1,18	1,25	1,08
7	относительная нагрузка котла $\bar{D}$	0,83	0,71	0,78

**Выводы.** Проведенные исследования подтвердили работоспособность диалоговой системы DMS для определения рациональных режимных параметров ТВП с целью повышения качества работы паровых котлов.

Сравнение базового и полученных вариантов показало, что даже при небольшом количестве испытаний  $N=100$  были найдены режимы работы котлоагрегата, лучшие исходных.

**Список литературы:** 1. Аэродинамический расчет котельных установок (нормативный метод). / Под ред. С.И. Мочана. Изд-е 3-е. – Л.: Энергия, 1977. – 256 с. 2. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод). / Под ред. Н.В. Кузнецова и др. – М.: Энергия, 1973. – 296 с. 3. Реализация теплового расчета энергетических котлоагрегатов на ЕС ЭВМ / В.И. Золотухин, Г.М. Каган, Н.Л. Баркан // Тр. ЦКТИ. –1984. – Вып. 210. – С. 75-78. 4. ППП для теплового расчета котлов-утилизаторов и энерготехнологических котлов / В.Д. Терентьев, Ю.Н. Кузнецов, Б.Я. Певзнер, А.А. Костюченко // Тр. ЦКТИ. –1984. – Вып. 210. – С. 72-74. 5. Система КРОКУС - автоматизированное проектирование, комплексные расчеты, оптимизация котельных установок. / Левин М.М. и др. // Энергетика и электрификация, 2001. – № 7. – С. 45-48. 6. Корягин В.С. Система оптимального проектирования энергетического оборудования на базе типовых элементов. // Теплоэнергетика. – 1999. – № 9.– С.60-61. 7. Беднаржевский В.С. Разработка прикладных компьютерных программ для автоматизации расчета (проектирования) энергетических котлоагрегатов. // Проблемы энергетики. – 2003. – № 1-2. – С.10-15. 8. Карницкий Н.Б., Кадач Т.В. К построению оптимизационной модели трубчатых воздухоподогревателей паровых котлов. // Вестник БНТУ. – № 6, 2006. – С. 76-78. 9. Соболев И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах с многими критериями – М.: Наука, 1981. – 130 с. 10. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1978. – 400 с.

Поступила в редколлегию 20.05.07

**Т.Б. НИКИТИНА**, канд. техн. наук, доцент

## **РОБАСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТРЕХОПОРНОЙ УПРАВЛЯЕМОЙ ПЛАТФОРМОЙ**

Розроблений метод робастного управління трехопорной платформою як три масовою електромеханічною системою для стабілізації динамічних характеристик системи управління. Приведений приклад динамічних характеристик синтезованої системи управління трехопорной платформою.

This article deals with the mathematical model, robust control, robust observe for three-point guided platform as electrical mechanical systems. There is example of the robust control for three-point guided platform.

**Постановка проблемы.** Многие современные системы управления измерительными приборами на основе трехопорных управляемых платформ построены по различным схемам и имеют несколько степеней свободы. В последнее время наиболее широкое распространение получили трехопорные платформы, управляемые двумя и более исполнительными двигателями по двум углам поворота относительно третьей неподвижной опоры [1-3]. В таких платформах можно значительно компенсировать, а в некоторых случаях полностью устранить основные недостатки, присущие управляемым платформам, построенным на принципах Карданного подвеса и сферической опоры. В трехопорных управляемых платформах используются следящие приводы с исполнительными механизмами линейного перемещения, что позволяет легко обеспечить выборку люфтов, так как весовая нагрузка на платформу знакопостоянна. Кроме того в таких платформах можно обеспечить более высокую жесткость, так как нет перехода с одной рамки на другую рамку Карданного подвеса, а также более высокие плавность и точность перемещения нагрузки за счет применения многозаходности винтовой передачи или непосредственной связи гидроцилиндров с нагрузкой.

**Анализ литературы.** Характер динамических процессов в режимах буксования машин в значительной степени определяются наличием упругих элементов в кинематической цепи электромеханической системы от приводного двигателя до рабочего органа. Возникновение колебаний в режиме буксования в основном обусловлено наличием падающего участка в характеристике внешнего трения. Причем, такой падающий участок особенно характерен при работе электромеханических систем на низких скоростях движения рабочего органа, что часто сопровождается его неплавным движением. Синтез таких систем рассмотрен в [3-5]. Однако синтезированные таким образом системы обладают различными

динамическими характеристиками при работе на восходящем и падающем участках характеристики внешнего трения.

**Цель статьи.** Целью данной статьи является синтез робастного управления трехопорной управляемой платформой как трехмассовой электромеханической системы для стабилизации динамических характеристик при изменении рабочих точек на характеристиках внешнего трения.

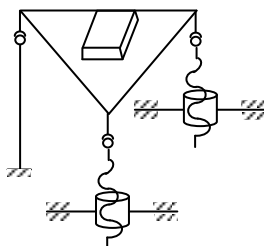


Рис.1 - Схема трехопорной платформы

Схема трехопорной платформы показана на рис. 1.

**Изложение материала исследования, полученных научных результатов.** Основу трехопорной управляемой платформы составляет рама, на которой расположена нагрузка. Две неподвижные опоры с помощью сферических шарниров соединены с приводными винтами исполнительных двигателей, за счет чего осуществляется перемещение двух подвижных опор относительно третьей неподвижной. Приводы соединены с основанием через шарниры, обеспечивающие поворот исполнительных двигателей относительно основания. Следует заметить, что такая платформа может быть также установлена на подвижном основании [3].

Одной из особенностей следящего привода трехопорных управляемых платформ (ТУП) является неуравновешенность нагрузки. Это обстоятельство в сочетании с необходимостью удержания нагрузки в произвольном угловом положении при выключенном приводе явилось причиной широкого распространения в качестве ИМЛП самотормозящих передач. При этом могут быть получены и дополнительные преимущества: большое передаточное число при малых габаритных размерах, высокая размерность перемещения в тяговом режиме, возможность удержания нагрузки благодаря детектирующим свойствам передачи. Однако, в динамических режимах, при определенных условиях работа самотормозящих передач сопровождается автоколебаниями, что недопустимо для следящего привода.

Исследуем динамику привода, схема которого показана на рис. 2.

За расчетную схему исполнительного механизма с передачей винт – гайка и неуравновешенной нагрузкой принимаем схему клинового механизма, показанную на рис.3.

Возможная работа по перемещению по координате  $x_2$ , совершаемая силой трения в сопряжении «винт – гайка» и силами вязкого сопротивления при деформациях редуктора и штока, Возможная работа по координате  $x_4$  совершается силой вязкого сопротивления при деформации штока. Для рассматриваемой системы масса винта, приведенная к оси гайки, на два порядка меньше массы гайки, поэтому массой винта можно пренебречь.

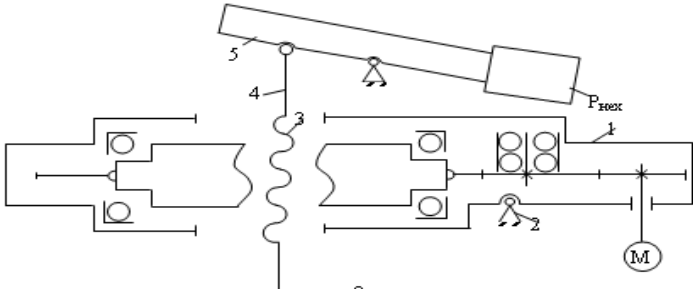


Рис. 2 - Схема исполнительного механизма линейного перемещения:  
1 – корпус; 2 – ось вращения корпуса; 3 – ходовой винт; 4 – шток;  
5 – нагрузка; 6 – ось вращения нагрузки.

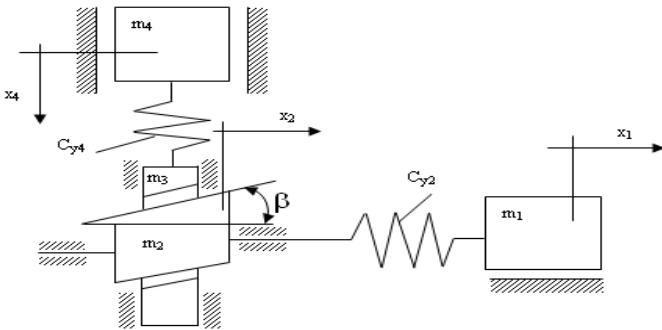


Рис. 3 - Клиновой механизм:  $m_i$  - масса;  $P_i$  - вес;  $C_{y2}$  - жесткости зубчатого редуктора, штока с опорным устройством привода;  $x_i$  - координата;  $\beta$  - угол подъема резьбы винта;  $i = \overline{1,4}$  (1 – электродвигатель; 2 – ходовая гайка; 3 – ходовой винт; 4 – неуравновешенная нагрузка).

Рассмотренная система фактически является трехмассовой электромеханической системой с приводным двигателем постоянного тока ПБСТ – 22, замкнутым по скорости вращения. При этом роль первой массы играет момент инерции ротора электродвигателя, роль второй массы играет

ходовая гайка совместно с ходовым винтом, а роль третьей массы играет неуравновешенная нагрузка. При этом жесткость зубчатого редуктора, штока с опорным устройством привода является эквивалентной жесткостью между первой и второй массой, а жесткостью между второй и третьей массой является жесткость винта, соединяющая привод с управляемой платформой. Заметим, что между первой массой и неподвижным основанием и между третьей массой и подвижной платформой имеются силы трения, препятствующие движению этих масс. Эквивалентная вторая масса представляет собой объединение массы ходовой гайки и ходового винта, так что при движении ходовой гайки относительно ходового винта возникает сила трения, и, кроме того, возникают силы трения между вращающейся ходовой гайкой и неподвижным основанием и вращающимся ходовым винтом и основанием привода. Приведем эту схему к вращательному движению обозначив соответствующие моменты инерции первой, второй и третьей масс соответственно  $J_1, J_2, J_3$ .

В последнее время подавляющее большинство приводов мощностью до нескольких сотен киловатт комплектуются асинхронными двигателями с частотными преобразователями. При векторном управлении асинхронными приводами в большинстве систем управления реализован алгоритм прямого управления моментом двигателя. При этом по данным большинства фирм производителей частотных преобразователей [3], время нарастания момента не превышает 5 мс. Время спада момента при таком алгоритме управления вообще принимается нулевым. Поэтому будем предполагать, что в системе используется частотное управление приводным двигателем, в системе реализовано прямое управление моментом, а математическую модель контура управления моментом примем в виде апериодического звена первого порядка с постоянной времени, равной времени нарастания момента.

Уравнения динамики такой системы примут следующий вид:

$$J_3 \frac{d\omega_3}{dt} = M_{y23} + \beta_{23}(\omega_2 - \omega_3) - \beta_{c3}\omega_3 - M_c$$

$$\frac{dM_{y23}}{dt} = C_{23}(\omega_2 - \omega_3)$$

$$J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = M_{y12} + \beta_{12}(\omega_1 - \omega_2) - M_{y23} - \beta_{23}(\omega_2 - \omega_3) - \beta_{c2}\omega_2$$

$$\frac{dM_{y12}}{dt} = C_{12}(\omega_1 - \omega_2)$$



$$J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M_\delta - M_{y12} - \beta_{12}(\omega_1 - \omega_2) - \beta_{c1}\omega_1$$

$$T_\mu \frac{dM_\delta}{dt} = -M_\delta + KU_{ex}$$

В этих уравнениях:

$\omega_1, \omega_2, \omega_3$ -скорости вращения двигателя, ходовой гайки и ходового винта; а также скорости вращения нагрузки;  $M_{y12}, M_{y23}$ -моменты упругости в валах;  $C_{12}, C_{23}$ , и  $\beta_{12}, \beta_{23}$ -жесткости и коэффициенты внутреннего вязкого трения в валах на скручивание;  $T_\mu$  - постоянная времени частотного преобразователя, характеризующая время нарастания момента двигателя;  $K$  - коэффициент усиления частотного преобразователя.

В этих уравнениях учтено наличие падающих участков в зависимостях моментов внешнего трения от скорости вращения двигателя  $\omega_1$  с жесткостью  $\beta_{c1}$ , от скорости вращения ходовой гайки и ходового винта  $\omega_2$  с жесткостью  $\beta_{c2}$  и от скорости вращения нагрузки  $\omega_3$  с жесткостью  $\beta_{c3}$ .

В качестве примера на рис. 4 показан переходный процесс момента упругости  $M_{y23}$ , построенный по разработанной математической модели.

Введем следующие компоненты вектора внешних воздействий  $\vec{w}(t)$ : задающее воздействие скорости вращения  $\omega_r(t)$ , помеху  $f_1$  измерения скорости вращения двигателя  $\omega_1$  фиктивная помеха  $f_2$  измерения переменной состояния интегратора  $z(t)$  так, что  $\vec{w}(t) = \{\omega_r(t), f_1(t), f_2(t)\}^T$ .

Введем в вектор контролируемых переменных  $\vec{z}(t)$  ошибку  $\varepsilon(t)$  между заданным  $\omega_r(t)$  и фактическим  $\omega_1(t)$  значениями скорости вращения двигателя  $\varepsilon(t) = \omega_r(t) - \omega_1(t)$ , выходное напряжение интегратора  $z(t)$  и управляющее напряжение на входе частотного преобразователя  $U(t)$  в следующем виде  $\vec{z}(t) = \{\varepsilon(t), z(t), U(t)\}^T$ .

Компоненты вектора измеряемых переменных  $\vec{y}(t)$  примем измеренные скорости вращения двигателя  $\omega_{1u} = z(t) + f_1(t)$  и измеренную переменную состояния интегратора  $z_u(t) = z(t) + f_2(t)$  так, что  $\vec{y}(t) = \{\omega_{1u}(t), z_u(t)\}^T$ .

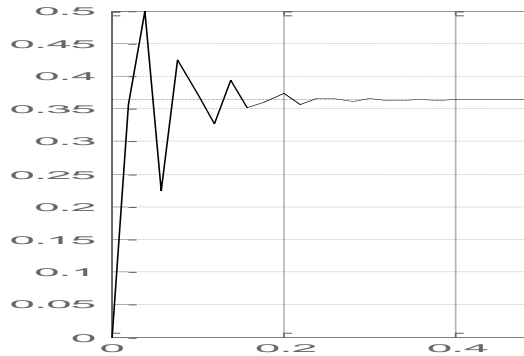


Рис. 4 Переходный процесс момента упругости в исходной системе.

При таком подходе можно получить приемлемые показатели качества переходного процесса по задающему воздействию, однако переходные процессы по моменту сопротивления  $M_c$  являются сильно колебательными. Для уменьшения колебательности переходных процессов по моменту сопротивления введем в вектор возмущений исходной системы  $\vec{w}(t)$  первую компоненту  $M_c(t)$ , действующую на исходную систему в виде момента сопротивления, так что вектор  $\vec{w}(t)$  будет иметь следующий вид:  $\vec{w}(t) = \{M_c(t), \omega_3(t), f_1(t), f_2(t)\}$ . Подадим теперь это возмущение от момента сопротивления  $M_c(t)$  на вход исходной системы, задав ненулевую компоненту первого элемента в первый столбец матрицы  $B_1$ . Введем также это возмущение в вектор контролируемых параметров  $\vec{z}(t)$ , задав ненулевой компонентой первый элемент матрицы  $D_{11}$ .

**Результаты моделирования.** В качестве примера на рис. 5 показаны переходные процессы а) скорости  $\omega_3$ , б) момента упругости  $M_{y23}$ , в) скорости  $\omega_2$  по заданию на регулятор скорости. Установившиеся значения скоростей двигателя, редуктора и рабочего органа равны заданному значению скорости. На рис.6 показаны переходные процессы те же переменных состояния по моменту сопротивления.

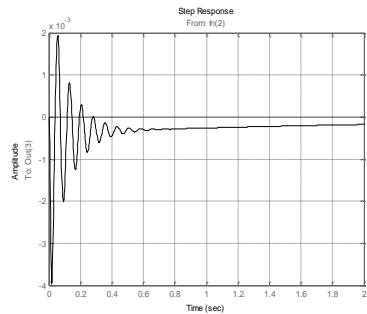
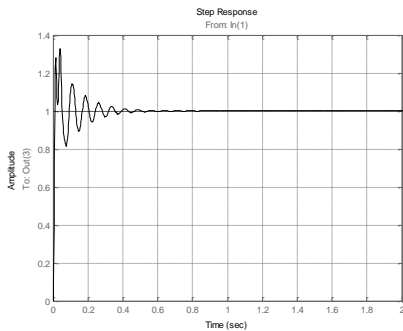
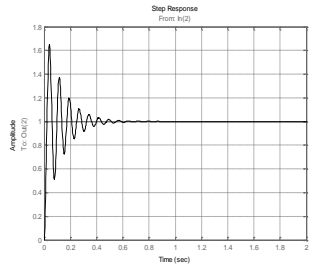
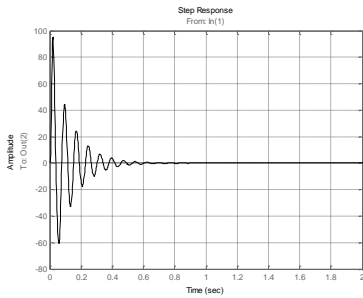
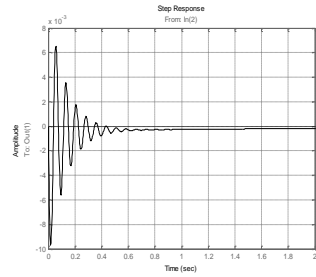
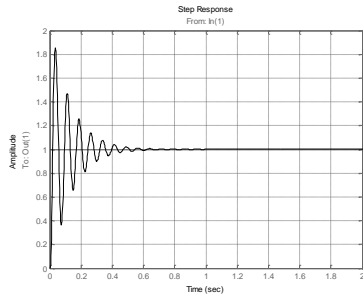


Рис. 5 Переходные процессы:  
 а) скорости  $\omega_3$ , б) момента упругости  $M_{y23}$ , в) скорости  $\omega_2$  по заданию на регулятор скорости.

Рис. 6 Переходные процессы:  
 а) скорости  $\omega_3$ , б) момента упругости  $M_{y23}$ , в) скорости  $\omega_2$  по моменту сопротивления.

Установившееся значение моментов равно заданному значению момента сопротивления, а установившиеся значения скоростей вращения приводного двигателя, редуктора и приводного механизма равны нулю. Подбирая матрицы в критерии качества исходной системе удалось получить приемлемые показатели качества переходных процессов как по задающему, так и по возмущающему воздействиям. Время переходных процессов составляет около 0,4 секунд. Переходные процессы устойчивые и имеют одинаковые установившиеся значения. Для падающего участка кривой с наибольшим наклоном переходные процессы имеют наибольшее перерегулирование, а при работе на восходящем участке перерегулирование переходных процессов имеет минимальное значение. Как видно из этих графиков, с помощью одного робастного регулятора, синтезированного без учета влияния характеристики внешнего трения, удалось получить устойчивые переходные процессы для трех рассматриваемых значений коэффициентов наклона характеристики внешнего трения.

**Выводы.** Таким образом, в данной работе для стабилизации динамических характеристик трехпорной управляемой платформы как трехмассовой электромеханической системы в режиме буксования при ее работе на различных участках характеристики внешнего трения предложено использовать робастное управление. Для синтеза робастного управления необходимо решать два уравнения Риккати по управлению по наблюдению. Подбирая весовые матрицы в критерии качества синтезируемой системы и параметр толерантности можно получить удовлетворительные переходные процессы при работе системы на различных участках характеристики внешнего трения.

**Список литературы:** 1. Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Коломиец В.В. Синтез электромеханических систем со сложными кинематическими цепями. Харьков, УИПА.2005. – 511с. 2. Кузнецов Б.И., Осичев А.В., Чаусов А.О. Оптимальное управление главным приводом блюминга в режиме пробуксовки валков. Техническая электродинамика, Киев, 2000, часть 6, с. 23-28. 3. Никитина Т.Б. Синтез многоканальных нелинейных электромеханических систем. //Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Харьков. НТУ «ХПИ». – 2005. - №45. - С. 130 – 131. 4. Никитина Т.Б. Синтез приближенно – оптимальных нелинейных систем цифрового управления технологическими процессами с аналитическими нелинейностями. //Автоматизация виробничих процесів. Київ.- 2003. - №2(17). - С.62-65. 5. Никитина Т.Б. Приближенно оптимальное цифровое управление электроприводами с аналитическими нелинейностями. //Вестник НТУ «ХПИ». Сб. научных трудов. Харьков: НТУ «ХПИ». - 2003. - №10. Т1. - С.321-322.

*Поступила в редколлегию 05.03.01*

**В. П. ОЛЬШАНСКИЙ**, д-р физ.-мат. наук, ХНТУСХ,  
**С. В. ОЛЬШАНСКИЙ**, НТУ «ХПИ»

## НЕЛИНЕЙНАЯ МОДЕЛЬ УСКОРЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ИСПАРЯЮЩЕЙСЯ КАПЛИ ГАЗОВЫМ ПОТОКОМ ПЕРЕМЕННОЙ СКОРОСТИ

Описано рух краплі, яка випаровується, як матеріальної точки, що зменшує масу, нелінійним диференціальним рівнянням зі змінними коефіцієнтами. За допомогою спеціального перетворення при рівнозмінному русі газу знайдено аналітичний розв'язок задачі Коші в функціях Бесселя.

Описано движение испаряющейся капли, как материальной точки убывающей массы, нелинейным дифференциальным уравнением с переменными коэффициентами. С помощью специального преобразования при равнопеременном движении газа найдено аналитическое решение задачи Коши в функциях Бесселя.

The motion of an evaporating drop, as material point of decreasing mass, nonlinear differential equation with variable factors has been described. By special transformation at equalvariable motion of gas the analytical solution of Cauchy problem using Bessel functions is found.

**Состояние вопроса, цель исследования и постановка задачи.** В технике встречаются случаи, когда движение газа применяют для разгона (ускорения движения) частиц жидкости и образования распылённых струй. Такие процессы используют в двигателях внутреннего сгорания [1], в ракетной технике и авиации [2], в пожарном деле [3] и других областях. На основе численных методов созданы достаточно сложные модели движения и разработаны программы их компьютерной реализации [4,5]. Однако это не исключает поиска компактных аналитических решений упрощённых задач этого класса, допускающих "прозрачный" анализ влияния основных факторов на процесс движения и выявления характерных его особенностей. Из исследований в этом направлении укажем на работы [6,7], в которых предложены аналитические решения задач в линейной постановке, а также в нелинейной – без учёта испарения капли. Но при движении частицы жидкости в среде с высокой температурой приходится учитывать испарение. Поэтому совершенствование расчётных моделей движения испаряющихся капель относится к актуальным задачам.

Здесь при постановке задачи каплю считаем сферовидным телом, радиус которого  $r(t)$  является линейной функцией времени движения  $t$ , т.е. берём в виде [6]

$$r(t) = r_0 - \gamma t,$$

где  $r_0 = r(0)$ ;  $\gamma$  - параметр, характеризующий интенсивность испарения.

Силу аэродинамического взаимодействия частицы с потоком газа  $F_a$  принимаем пропорциональной площади миделевого сечения сферы и квадрату скорости обтекания газом. Согласно этому допущению

$$F_a = k\pi^2(\nu - V(t))^2,$$

где  $k$  - постоянный коэффициент пропорциональности;  $\nu = \nu(t)$  - скорость движения центра капли;  $V(t)$  - скорость потока газа.

В дальнейшем ограничимся случаем, когда

$$V(t) = V + at, \quad (V, a = \text{const}),$$

что соответствует движению газа с постоянным ускорением (или замедлением), а скорость движения центра капли является решением нелинейного дифференциального уравнения

$$\dot{\nu} - \frac{\beta}{r_0 - \gamma} (\nu - V - at)^2 = 0, \quad (1)$$

в котором  $\beta = \frac{3}{4}k$ ; точка означает производную по времени  $t$ .

Из-за малости массы капли и кратковременности промежутка разгона действием веса капли в уравнении (1) пренебрегаем.

Решение уравнения (1) будем находить при начальном условии

$$\nu(0) = \nu_0, \quad (2)$$

соблюдая неравенство  $\nu \leq V + at$ .

**Построение замкнутых аналитических решений задачи Коши.**

Введём вспомогательную функцию  $u(t) = \nu - V - at$ . Тогда  $\dot{u} = \dot{\nu} - a$  и вместо (1) получаем

$$\frac{du}{dr} + \frac{\beta}{\gamma r} u^2 = \frac{a}{\gamma}. \quad (3)$$

Это уравнение типа Риккати. Согласно (2), начальным условием к нему является

$$u_0 = u(r_0) = \nu_0 - V. \quad (4)$$

Чтобы избавиться от нелинейности, следуя [7], выразим  $u$  через неизвестную функцию  $w(r)$  и её производную по формуле

$$u = \frac{\gamma r}{\beta} \frac{dw}{w} \frac{dr}{r}. \quad (5)$$

Подставив (5) в (3), приходим к линейному уравнению, но более высокого порядка

$$\frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dw}{dr} - \frac{a\beta}{\gamma^2 r} w = 0. \quad (6)$$

Далее, в зависимости от знака  $a$ , будем различать три случая.

Первый случай ( $a > 0$ ) соответствует равноускоренному движению газа. Для него решение уравнения (6) имеет вид [7]

$$w(r) = c_1 I_0(\tau) + c_2 K_0(\tau).$$

Здесь  $a_1 = \gamma^{-1} \sqrt{a\beta}$ ;  $\tau = 2a_1 \sqrt{r}$ ,  $I_0(\tau)$ ,  $K_0(\tau)$  модифицированная функция Бесселя и функция Макдональда нулевых индексов;  $c_1, c_2$  - произвольные постоянные.

Выполнив дифференцирование цилиндрических функций, в соответствии с (5) и начальным условием (2), находим аналитическое выражение скорости капли

$$v(t) = V + at - \frac{a_1 \sqrt{r}}{\beta_0} \frac{c_3 K_1(\tau) - I_1(\tau)}{c_3 K_0(\tau) + I_0(\tau)}. \quad (7)$$

Здесь  $c_3 = \frac{a_1 \sqrt{r_0} I_1(\tau_0) + \beta_0 (V - v_0) I_0(\tau_0)}{a_1 \sqrt{r_0} K_1(\tau_0) - \beta_0 (V - v_0) K_0(\tau_0)}$ ;  $\tau_0 = 2a_1 \sqrt{r_0}$ ;  $\beta_0 = \beta \gamma^{-1}$ ;  $I_1(\tau)$ ,

$K_1(\tau)$  - модифицированная функция Бесселя и функция Макдональда первого порядка.

Второй случай ( $a < 0$ ) соответствует равнозамедленному движению газа. Решением уравнения (6) является

$$w(r) = c_1 J_0(\delta) + c_2 Y_0(\delta). \quad (8)$$

Здесь  $\delta = 2b_1 \sqrt{r}$ ,  $b_1 = \gamma^{-1} \sqrt{-a\beta}$ ,  $J_0(\delta)$ ,  $Y_0(\delta)$  - функции Бесселя и Неймана нулевого индекса.

Используя (8), (5), (2) для скорости движения капли получаем

$$v(t) = V + at - \frac{b_1 \sqrt{r}}{\beta_0} \frac{c_4 Y_1(\delta) + J_1(\delta)}{c_4 Y_0(\delta) + J_0(\delta)}, \quad (9)$$

причём  $c_4 = \frac{b_1 \sqrt{r_0} J_1(\delta_0) - \beta_0 (V - \nu_0) J_0(\delta_0)}{\beta_0 (V - \nu_0) Y_0(\delta_0) - b_1 \sqrt{r_0} Y_1(\delta_0)}$ ,  $\delta_0 = 2b_1 \sqrt{r_0}$ ,  $I_1(\delta)$ ,  $Y_1(\delta)$  -

функции Бесселя и Неймана индекса единица.

Третий случай ( $a=0$ ) соответствует равномерному движению газа. Решение задачи Коши выражается в элементарных функциях и имеет вид

$$w(r) = c_1 + c_2 \ln r ;$$

$$\nu(t) = \frac{1}{(\nu_0 - V)^{-1} + \beta_0 \ln \frac{r}{r_0}} + V . \quad (10)$$

Из (10), при  $\nu_0 = 0$ , следует формула скорости, которая была ранее получена в работе [6].

Таким образом, используя (7), (9), (10) и таблицы функций Бесселя [8,9], можно вычислить скорость капли  $\nu(t)$  в потоке газа при его равнопеременном движении.

**Формулы приближённого вычисления пути.** На практике, кроме скорости разгона, представляет интерес путь  $S(t)$ , пролетаемый каплей в газе. Определение его сводится к вычислению интеграла

$$S(t) = \int_0^t \nu(t) dt , \quad (11)$$

который для решений (7), (9) не удаётся выразить через известные табулированные функции. Исключением является третий случай движения газа, когда  $a=0$ . Для него

$$S(t) = Vt - \frac{r_0}{\beta} e^b \left[ Ei \left( -b - \ln \left( \frac{r_0}{r_0 - \gamma t} \right) \right) - Ei(-b) \right] .$$

Здесь  $b = \frac{\gamma}{\beta(V - \nu_0)}$ ;  $Ei(-\eta)$  - интегральная показательная функция, таблицы которой имеются в [8,9] и других изданиях по специальным функциям.

Чтобы получить приближённые формулы определения  $S(t)$ , когда  $a \neq 0$ , вычислим предел

$$\nu_\gamma(t) = \lim_{\gamma \rightarrow 0} \nu(t) .$$



Используя асимптотику цилиндрических функций большого аргумента [8],

$$J_\nu(z) \sim \sqrt{\frac{2}{\pi z}} \cos\left(z - \frac{\nu\pi}{2} - \frac{\pi}{4}\right),$$

$$Y_\nu(z) \sim \sqrt{\frac{2}{\pi z}} \sin\left(z - \frac{\nu\pi}{2} - \frac{\pi}{4}\right),$$

$$I_\nu(z) \sim \frac{e^z}{\sqrt{2\pi z}},$$

$$K_\nu(z) \sim \sqrt{\frac{\pi}{2z}} e^{-z},$$

при  $\nu = 0,1$ , находим, что

$$v_\gamma = V + at - \frac{r_0\omega}{\beta} \begin{cases} \frac{c \cdot ch(\omega t) + sh(\omega t)}{ch(\omega t) + c \cdot sh(\omega t)} & \text{при } a > 0, \\ \frac{c \cdot \cos(\omega t) - \sin(\omega t)}{\cos(\omega t) + c \cdot \sin(\omega t)} & \text{при } a < 0. \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{Здесь } \omega = \sqrt{\frac{|a|\beta}{r_0}}; \quad c = \frac{\beta(V - v_0)}{\omega r_0}.$$

Интеграл от предельного значения скорости  $S_\gamma(t) = \int_0^t v_\gamma(t) dt$  сводится к элементарным функциям. Действительно,

$$S_\gamma(t) = Vt + \frac{at^2}{2} - \frac{r_0}{\beta} \begin{cases} \ln[ch(\omega t) + c \cdot sh(\omega t)] & a > 0, \\ \ln[\cos(\omega t) + c \cdot \sin(\omega t)] & \text{при} \\ & a < 0. \end{cases} \quad (13)$$

На малом промежутке времени разгона капли невязка  $\Delta S(t) = S(t) - S_\gamma(t)$  - небольшая. Её с приемлемой точностью можно найти по формуле Симпсона

$$\Delta S(t) \approx \frac{t}{6} \left[ v(t) - v_\gamma(t) + 4v\left(\frac{t}{2}\right) - 4v_\gamma\left(\frac{t}{2}\right) \right]. \quad (14)$$

В итоге вычисление пролетаемого каплей пути сводится к формуле

$$S(t) = S_\gamma(t) + \Delta S(t), \quad (15)$$

где второе слагаемое находится приближённо. Для проведения расчёта, в зависимости от знака  $a$ , приходится использовать выражения (7), (9), (12-15).

**Численные результаты и их анализ.** Сравним величины скорости и перемещения, полученные различными методами. При этом примем следующие исходные данные:  $r_0 = 10^{-3}$  м;  $\gamma = 2 \cdot 10^{-3}$  с<sup>-1</sup>;  $\beta = 4 \cdot 10^{-3}$ ;  $v_0 = 0$ ;  $V = 30$  м/с;  $t = 0,12$  с.

Таблица 1

Значения скорости капли при различных ускорениях газа, полученные различными способами

$a$ , м/с <sup>2</sup>	30	20	10	0	-10	-20	-30
По фор. (7), (9), (10)	30,838	29,957	29,104	28,282	27,506	26,769	26,100
По формуле (12)	30,511	29,663	28,842	-	27,300	26,593	25,943

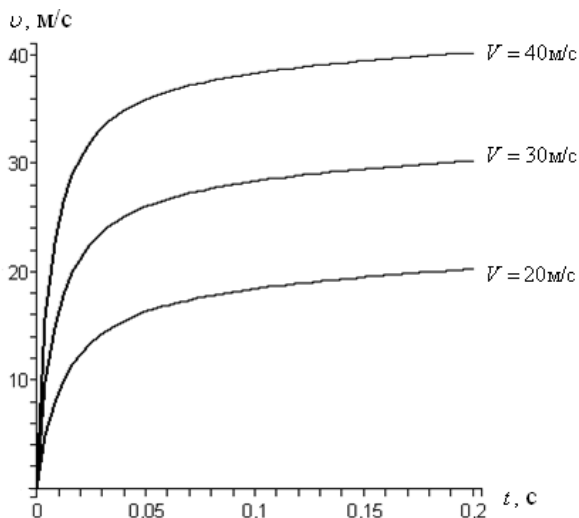
Таблица 2

Значения перемещения капли при различных ускорениях газа, полученные различными способами

$a$ , м/с <sup>2</sup>	30	20	10	0	-10	-20	-30
Числ.интег. (11)	3,081	3,031	2,984	2,938	2,892	2,848	2,806
По форм. (15)	3,080	3,031	2,984	2,938	2,891	2,847	2,805

Результаты в табл. 1 и 2 свидетельствуют о высокой точности предложенных формул. Для расчёта скорости наиболее удобна компактная формула (12).

Рассмотрим как влияет скорость потока газа на процесс разгона частицы. Для этого примем  $a = 10$  м/с и прежние исходные данные. Результаты расчётов представлены на рисунке. Из него видно, что у кривых существует два характерных участка, на первом частица быстро набирает скорость, а на втором  $v(t)$  асимптотически стремится к скорости газа. Из-за малости размеров и массы капли процесс разгона происходит за короткий промежуток времени, что позволяет пренебрегать силой веса капли.



Зависимость  $v(t)$  при различных скоростях потока газа

**Выводы.** Предложенные формулы позволяют вычислять параметры движения испаряющейся капли без численного решения задачи Коши. Высокая точность приближённых аналитических решений подтверждена путём сравнения результатов, к которым они приводят, с результатами численного интегрирования.

**Список литературы:** 1. *Лышевский А.С.* Распыливание топлива в судовых дизелях. – Л.: Судостроение, 1971. – 248с. 2. *Борисенко А.И., Селиванов В.Г., Фролов С.Д.* Расчёт и экспериментальное исследование газожидкостного сопла при значительном содержании жидкости в газе. Сб. научн. тр.: Вопросы газотермодинамики энергоустановок. Вып. 1. – Харьков: ХАИ, 1974. – С. 83 – 93. 3. *Абрамов Ю.А., Росоха В.Е., Шаповалова Е.А.* Моделирование процессов в пожарных стволах. – Харьков: Фолио, 2001 – 195с. 4. *Стернин Л.Е.* Основы газодинамики двухфазных потоков в соплах. – М.: Машиностроение, 1974. – 211с. 5. *Васильев Ю.Н.* Теория двухфазного газожидкостного эжектора с цилиндрической камерой смешения. В кн.: Лопаточные машины и струйные аппараты. Вып. 5 – М.: Машиностроение, 1971. С. 175 – 261. 6. *Кучеренко С.И., Ольшанський В.П., Ольшанський С.В., Тищенко Л.М.* Моделивання польоту крапель, які випаровуються при русі в газі. – Харків: Едена, 2006. – 203с. 7. *Кучеренко С.И., Ольшанський В.П., Ольшанський С.В., Тищенко Л.М.* Балістика крапель, які випаровуються при польоті. – Харків: Едена, 2007. – 303с. 8. *Абрамовиц А., Стиган И.* Справочник по специальным функциям(с формулами, графиками и математическими таблицами). – М.: Наука, 1979. – 832с. 9. *Янке Е., Эмде Ф., Лёш Ф.* Специальные функции. – М.: Наука, 1977.-344с.

Поступила в редколлегию 06.05.07

*Л. М. ЛЮБЧИК*, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ", г. Харьков,  
*А. А. МИРОШНИЧЕНКО*, ХНАГХ, г. Харьков

## **ДИАГНОСТИКА РАЗЛАДКИ В СТРУКТУРЕ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СОБСТВЕННЫХ ЧИСЕЛ СИНГУЛЯРНО-СПЕКТРАЛЬНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ**

Запропонована методика діагностики зміни структури часових рядів, заснована на використанні сингулярно-спектрального аналізу. Приведені результати експериментальних досліджень на основі тестового прикладу застосування вказаної методики в задачі виявлення зміни структури полігармонійного часового ряду.

Предложена методика диагностики изменения структуры временных рядов, основанная на использовании сингулярно-спектрального анализа. Приведены результаты экспериментальных исследований на основе тестового примера применения указанной методики в задаче обнаружения изменения структуры полигармонического временного ряда.

The method of structure changing diagnostic of time series, based on singular-spectral analysis, is proposed. The results of experimental researches are presented using test example of the indicated method application in the task of structure changing detection for multi-harmonic time series.

**Введение и анализ состояния проблемы.** Одной из важных составляющих задачи мониторинга состояния сложных технических систем является обнаружение моментов изменения динамических свойств объекта наблюдения. Формализацией подобной проблемы является известная "задача о разладке", суть которой состоит в обнаружении моментов изменения свойств случайного процесса по наблюдаемым реализациям, в качестве которых обычно используются временные ряды наблюдений за переменными, характеризующими состояние процесса. Вопросам изучения математических моделей временных рядов сложной структуры были посвящены работы Дж. Бокса и Г. Дженкинса [1], Д. Бриллинджера [2], М. Кендалла и А. Стюарта [3,4], Н.Е Кобринского [5], Ю.П. Лукашина [6], Р. Отнеса и Л. Энноксона [7], Э. Хеннана [8] и других исследователей. Математические методы решения "задачи о разладке" были рассмотрены в работах [9-11]. Необходимо отметить, что успех решения задачи во многом предопределяется удачным выбором модели временного ряда, что является самостоятельной достаточно сложной проблемой. На практике, как правило, используются достаточно простые модели типа "тренд плюс шум", либо модели авторегрессии – скользящего среднего. Их применение в тех случаях, когда "разладка" связана с изменением свойств временного ряда сложной структуры, например, волновых или хаотических процессов, может приводить к неудовлетворительным результатам.

Возникает необходимость в разработке достаточно универсальных методов обнаружения "разладок", не требующих задания точной априорной модели ряда. В настоящей работе решение указанной задачи осуществляется на основе метода сингулярно-спектрального анализа (SSA) [12].

**Постановка задачи и идея метода.** В настоящей работе рассматривается задача диагностики "разладки" в структуре временных рядов, состоящих из аддитивных периодических составляющих с произвольными некрратными периодами. Подобная модель позволяет описывать ряды достаточно сложной структуры, по виду подобные хаотическим процессам. Предполагается, что "разладка" связана с возникновением в структуре ряда новых гармоник с априори неизвестными параметрами. Таким образом, задача состоит в обнаружении по наблюдениям за временным рядом момента появления новых гармоник.

Для рассматриваемой задачи обосновано применение метода сингулярно-спектрального анализа [12], основанного на преобразовании одномерного временного ряда  $F_N = \{f_1, \dots, f_N\}$  в матрицу  $X$  (траекторную матрицу), исследовании ее с помощью анализа главных компонент (сингулярного разложения), разложении временного ряда на аддитивные структурные компоненты и восстановлении ряда по выбранным наиболее значимым главным компонентам.

Разложение включает в себя этапы вложения (формирование траекторной матрицы при выбранной длине окна  $L$ ) и сингулярного разложения (формирование собственных троек и разложение траекторной матрицы на сумму элементарных матриц). Восстановление включает в себя группировку собственных троек и разделение аддитивных компонент ряда.

В процессе сингулярного разложения формируется набор собственных троек:  $\sqrt{\lambda_i}, U_i, V_i$ , где  $i$  - номер собственной тройки сингулярного разложения,  $\lambda_i$  - собственные числа матрицы  $R = XX^T$ ,  $U_i$  - собственные векторы матрицы  $R = XX^T$  (левые сингулярные векторы),  $V_i = \frac{1}{\sqrt{\lambda_i}} X^T U_i$  -

факторные векторы (правые сингулярные векторы). Каждое собственное число  $\lambda_i$  характеризует уровень значимости структурной компоненты ряда, восстановленной по данной собственной тройке. Поскольку каждая матричная компонента сингулярного разложения полностью определяется соответствующей сингулярной тройкой  $(\sqrt{\lambda_i}, U_i, V_i)$ , то чем больше сингулярное число  $\sqrt{\lambda_i}$  в собственной тройке, тем больше вклад компоненты ряда, восстановленной по данной собственной тройке.

Очевидно, что изменение структуры ряда приводит к изменению спектра матрицы  $R = XX^T$ . Таким образом, введенные выше сингулярные числа

являются информативными параметрами, которые и предлагается использовать для обнаружения моментов появления новых компонент. Достоинством такого подхода является отсутствие необходимости задания априорных моделей анализируемых компонент временного ряда.

**Методика решения задачи.** Основываясь на вышесказанном, предлагается следующая методика диагностики "разладки". Выбираем диапазон просмотра исследуемого временного ряда  $D$ . Выбор диапазона осуществляется на основе предварительного анализа временного ряда или использования априорной информации о периодах гармонических составляющих ряда. Желательно выбрать длину диапазона просмотра, как минимум вдвое превосходящую наибольший период.

Далее с помощью метода сингулярно-спектрального анализа проводится разложение фрагмента временного ряда, попавшего внутрь диапазона просмотра, и анализируется полученный в результате разложения набор собственных троек. На каждом последующем шаге границы диапазона просмотра смещаются на один элемент временного ряда (рис.1). Границы диапазона просмотра устанавливаются следующим образом: на первом шаге  $t \in [1; D]$ , на  $i$ -м шаге  $t \in [i; D+i-1]$ .

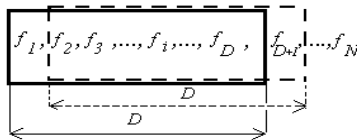


Рис.1. Установление границ диапазона просмотра

Поскольку каждая собственная тройка однозначно определяет компоненту разложения, то анализ изменений в структуре собственных троек сингулярного разложения фрагмента ряда внутри диапазона просмотра дает возможность выявить структурные изменения временного ряда. Так появление новых собственных троек свидетельствуют о том, что во временном ряде появились новые структурные составляющие. Следует учитывать, что каждая гармоническая компонента порождает две собственные тройки с близкими сингулярными числами, поэтому о появлении новой гармонической составляющей в структуре ряда свидетельствует новая пара собственных троек в сингулярно-спектральном разложении очередного фрагмента ряда внутри диапазона просмотра. Исчезновение собственных троек в сингулярно-спектральном разложении свидетельствует о том, что соответствующие структурные компоненты более не присутствуют во временном ряду. Увеличение или уменьшение значений сингулярных чисел в собственных тройках говорит об изменении значимости соответствующих им компонент разложения. Если речь идет о гармонических структурных составляющих временного ряда, то изменение значений

сингулярных чисел может свидетельствовать об изменении амплитуды колебаний (об усилении или уменьшении воздействующего фактора, обуславливающего появление компоненты в структуре временного ряда).

Извлечение из диагностируемого ряда структурных компонент, имеющих большой уровень значимости, позволяет получить ряд остатков, анализ которых позволяет получить дополнительную информацию о моменте структурной "разладки".

Практическая реализация изложенной методики представлена на приведенном ниже тестовом примере.

**Тестовый пример.** В качестве тестового примера в данной работе по описанной методике исследуется временной ряд  $F_N = \{f_1, \dots, f_N\}$  длины  $N = 91$ , представленный на рис.2.

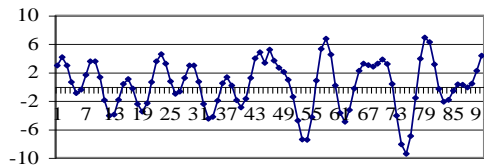


Рис.2. Исследуемый временной ряд

Исследуемый временной ряд получен путем сложения двух следующих гармоник:  $y_1 = 3 \sin(\frac{2\pi}{7}t)$ ,  $y_2 = 2 \sin(\frac{2\pi}{20}t)$ ,  $t = 1, 2, \dots, 91$  (рис.3). В момент времени  $t = 46$  в исследуемом временном ряду происходит структурное изменение, выраженное в появлении третьей структурной составляющей  $y_3 = 5 \sin(\frac{2\pi}{11}t)$ ,  $t = 46, \dots, 91$  (рис.3).

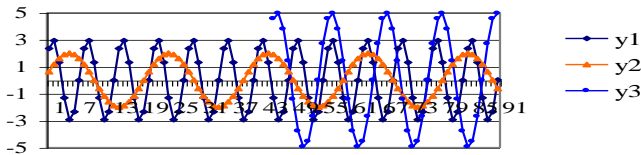


Рис. 3. Структурные компоненты временного ряда  $F_N$

Для анализа структурных изменений выбрана длина диапазона просмотра  $D = 40$ , длина окна для сингулярно-спектрального разложения фрагмента ряда внутри диапазона просмотра выбрана  $L = D/2 = 20$ . Сингулярно-спектральное разложение исследуемого ряда проводилось с помощью программного продукта "Caterpillar" [13]. Результаты последовательных вычислений собственных чисел сингулярного разложения представлены на рис.4.

Анализируя результаты, представленные на рис. 4, следует отметить, что до момента времени попадания в диапазон просмотра точки "разладки" ( $t = 46$ ), наблюдались две пары собственных троек с номерами 1, 2 и 3, 4 (и собственных чисел соответственно), определяющих структурные компоненты временного ряда  $y_1$  и  $y_2$ . При попадании точки "разладки" в диапазон просмотра появляется новая пара собственных чисел с номерами 5, 6 (и собственных троек соответственно), а также наблюдается "разладочная" (или "сигнальная") компонента, появление которой свидетельствует о том, что в диапазон просмотра попал момент времени возникновения структурного изменения временного ряда. На рис. 4 "разладочной" компоненте соответствует группа собственных троек с номерами от 7 до 20 (сумма собственных чисел  $\lambda_i \neq 0, i = 7, \dots, 20$ ). Следует отметить, что при выходе точки "разладки" из диапазона просмотра "разладочная" компонента более не наблюдается (собственные числа  $\lambda_i = 0, i = 7, \dots, 20$ ).

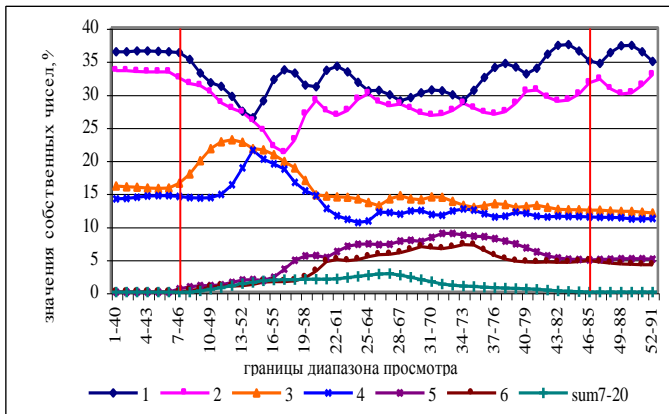


Рис.4. Динамика собственных чисел сингулярного разложения

В процессе перемещения окна просмотра пока оно содержит точку "разладки", в связи с появлением новой компоненты  $y_3$ , изменяются уровни значимости компонент  $y_1$  и  $y_2$ . При выходе точки "разладки" из диапазона просмотра, расположение структурных компонент в зависимости от уровня значимости (выражено в значениях собственных чисел) меняется. На первое место выходит новая структурная компонента  $y_3$  (имеет наибольшую амплитуду  $A = 5$  и соответственно наибольший уровень значимости -  $\lambda_1, \lambda_2$ ), далее следует компонента  $y_1$  ( $A = 3, \lambda_3, \lambda_4$ ) и  $y_2$  ( $A = 2, \lambda_5, \lambda_6$ ) (рис.4).



Результаты применения методики определения момента времени возникновения "разладки" путем извлечения значимых структурных компонент для исследуемого временного ряда при диапазоне просмотра  $t \in [9, 48]$  приведены на рис.5 (а, б). Извлечение из исходного ряда данных структурной компоненты  $y_1$  (рис.5а), дает ряд остатков (рис.5б), анализ которого позволяет отчетливо идентифицировать момент структурной "разладки". В приведенном тестовом примере это точка, соответствующая моменту времени  $t = 46$  (рис.5б).

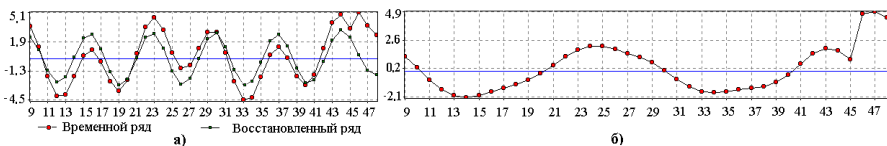


Рис. 5. а). Восстановление исходного временного ряда по первой паре собственных троек (извлечение структурной компоненты  $y_1$ )  
 б). Ряд остатков после извлечения структурной компоненты  $y_1$

**Выводы.** На основании полученных результатов экспериментальных исследований можно сделать вывод об эффективности применения изложенной методики диагностики "разладки" в структуре временных рядов на основе анализа собственных чисел сингулярно-спектрального разложения. При этом можно не только идентифицировать структурные изменения временного ряда, но и установить момент времени их возникновения.

**Список литературы:** 1. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. - М.: Мир, 1974. - 197с. 2. Бриллинджер Д.Р. Временные ряды. Обработка данных и теория. / Пер. с англ. А.В. Годлинского и др; Под ред. А.Н. Колмогорова. - М.: Мир, 1980. - 536с. 3. Кендалл М. Дж., Стюарт А. Многомерный статистический анализ и временные ряды. / Пер. с англ. Э.Л. Пресмана, В.И. Ротая; Под ред. А.Н. Колмогорова, Ю.В. Прохорова. - М.: Наука, 1976. - 736с. 4. Кендалл М. Дж., Стюарт А. Статистические выводы и связи. / Пер. с англ. Л.И. Гальчука, А.Т. Терехина / Под ред. А.Н. Колмогорова. - М.: Наука, 1973. - 899с. 5. Кобринский Н.Е. Информационные фильтры в экономике. Анализ одномерных временных рядов. - М.: Статистика, 1978, - 287 с., ил. 6. Лукашин Ю.П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования. - М.: Статистика, 1979. - 254с. 7. Отнес Р., Энксон Л. Прикладной анализ временных рядов. Основные методы. / Пер. с англ. В.И. Хохлова; Под ред. Журбенко. - М.: Мир, 1982. - 428с. 8. Хеннан Э. Многомерные временные ряды. / Пер. с англ. А. С.Холево; Под ред. Ю.А. Розанова. - М.: Мир, 1974. - 576с. 9. Ширяев А.Н. Статистический последовательный анализ. Оптимальные правила остановки. Изд. 2-е перераб. М.: Наука, 1976, - 272 с. 10. Никифоров И.В. Последовательное обнаружение изменения свойств временных рядов. М.: Наука, 1983, - 199 с. 11. Дарховский Б.С. Непараметрические методы в задачах о разладке случайной последовательности. // Статистика и управление случайными процессами. - М.: Наука, 1989.- С. 57-70. 12. Главные компоненты временных рядов: метод «Гусеница» // Под ред. Д.Л. Данилова, А.А. Жигляевского. СПб: Пресском, 1997. 13. Программный продукт "Caterpillar", <http://www.gistatgroup.com>

Поступила в редколлегию 10.05. 07

**В. А. ГУЖВА**, канд. техн. наук,  
**П. А. МАРИНЧЕВ**, студент НТУ «ХПИ»

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ В ЗАДАЧЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЛИЧНОСТИ ПО ФОТОРОБОТУ**

Наведено результати дослідження можливості ідентифікації особи по фотороботу із використанням методу головних компонент. Пропонується підхід щодо попередньої обробки зображень на основі геометричних закономірностей розташування рис обличчя, а також щодо формального опису особливих їх примет. Розглядається можливість зменшення вихідної кількості автоматично побудованих фотороботів.

Приведены результаты исследования возможности идентификации личности по фотороботу с использованием метода главных компонент. Предлагается подход к предварительной обработке изображений на основе геометрических закономерностей расположения черт лица, а также к формальному описанию их особенных характеристик. Рассматривается возможность уменьшения числа автоматически построенных исходных фотороботов.

An ability of person identification by facial composites using the principal component analyses method investigation's results are given. Approaches to pretreatment of images using facial shapes location rules and formal describing of face features are suggested. An ability of automatically constructed facial composites basic amount's decreasing is examined.

**Введение.** Наличие фоторобота преступника является весомым фактором в успешном расследовании большинства преступлений. Современный уровень развития информационных технологий предоставляет все больше возможностей как для совершенствования способов составления фотороботов, так и для скорейшей идентификации личности. Однако, если составление самого фоторобота не вызывает практически никаких затруднений, то идентификация полученного изображения по-прежнему остается слабым звеном в процессе проведения следственно-розыскных мероприятий. Это связано с тем, что имеющаяся у правоохранительных органов база данных людей очень велика, а сам процесс поиска в базе данных лиц «похожих» на фоторобот выполняется в большинстве случаев вручную.

**Постановка задачи.** Следует отметить, что на данный момент существует программное обеспечение, позволяющее определенным образом проиндексировать подобную базу данных: закрепить за каждым изображением определенную информацию – цвет лица, наличие или отсутствие усов, бороды и других особенных черт лица. Это позволяет сузить круг поиска лиц на этапе сравнения сформированного фоторобота. Но такая индексация не всегда возможна, в отличие от индексации элементов фоторобота. За каждым элементом изображения можно закрепить информацию о том, что это за элемент лица, каковы его особенные черты, какова его расовая принадлежность и т.д. Подобная индексация дает

возможность формировать различные фотороботы, соответствующие одному и тому же описанию преступника, т.к. одно и то же описание элемента лица может подходить под несколько имеющихся изображений. Так, например, если свидетель описал нос разыскиваемого человека, как «прямой с горбинкой», то под это описание может так же подойти «широкий прямой нос с горбинкой», «узкий прямой нос с горбинкой» и т.д. Конечно, чем точнее и подробнее будет описан нос, тем меньше будет вариантов. Но на практике, если речь идет, например, о преступлении, свидетели редко помнят мелкие детали лица подозреваемого. Они помнят в основном только общие черты лица. Реальные же фотографии разыскиваемых людей могут содержать те особенности элементов лица, которые по каким-либо причинам не были упомянуты при описании. Возникновение подобных нюансов при проведении следственно-розыскных мероприятий очень замедляет поиск или идентификацию личности, а уменьшение исходного числа лиц, среди которых следует искать описанную личность – по-прежнему очень актуально.

Возникает задача построения инструментария для автоматического составления фотороботов, учитывающего описанные выше особенности, позволяющего подвергать составленные фотороботы автоматической идентификации.

**Подход к идентификации по фотороботу.** В ряде зарубежных работ [1] описывается применение метода главных компонент для идентификации личности по изображению лица. Алгоритм идентификации с помощью данного метода можно описать следующей последовательностью действий. Вначале формируется база лиц обучающего набора. Затем, применяя метод главных компонент к этому набору, получают его «собственные лица»[1]. Далее получают координаты изображений в базисе «собственных лиц». Изображение лица, подвергаемое идентификации, так же раскладывается по базису из «собственных лиц». Далее находят минимальное расстояние между тестируемым изображением лица и изображениями из обучающего набора в пространстве лиц. Изображение обучающего набора, имеющее наименьшее Евклидово расстояние до тестируемого изображения в пространстве лиц, будет идентифицировано, как тестируемое изображение.

Исследование практического применения данного метода выявило его чувствительность к условиям съемки изображений лиц, так как в основе данного метода лежит оценка вариации значений соответствующих пикселей сравниваемых изображений. Улучшением качества идентификации в этом случае может служить предварительная обработка изображений – удаление фона, выделение основных контуров изображения, а также изменение ориентации изображений относительно друг друга [2].

Установлено, что в расположении черт лица человека друг относительно друга существует определенная закономерность[3]. Размеры определенных элементов лица человека подчиняются соотношению «золотого сечения»: высота лица / ширина лица; центральная точка соединения губ до основания

носа / длина носа; высота лица / расстояние от кончика подбородка до центральной точки соединения губ; ширина рта / ширина носа; ширина носа / расстояние между ноздрями; расстояние между зрачками / расстояние между бровями. Известно также, что хотя данные пропорции справедливы как для мужского типа лица, так и для женского, сами изображения лица мужчины и женщины все же отличаются друг от друга.

Приведенные выше пропорции позволили сформировать «маски» типичных изображений лиц мужчины и женщины (рис. 1). Ставя в соответствие центры зрачков на маске – центрам зрачков на изображении, вычисляется необходимый коэффициент масштабирования размеров исходного изображения к размерам маски. Вычисленный коэффициент позволяет преобразовать все изображения лиц к одному размеру (размеру маски). Координаты каждого элемента фоторобота следует так же задавать относительно центра используемой маски, тогда при автоматическом составлении фоторобота (на основе словесного описания) каждый элемент лица «станет» на свое место.

Соответствие расположения элементов фоторобота и элементов лица реальной фотографии очень важно для положительной идентификации методом главных компонент.

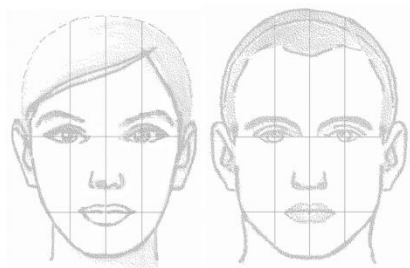


Рисунок 1 – «Маски» женского и мужского лица

В ряде работ [4,5] говорится о возможности идентификации одновременно по нескольким фотороботам, построенным на основании одного и того же словесного описания. Следует отметить, что подобное возможно, при индексировании базы данных элементов фотороботов способом, описанным выше. Остановимся более подробно на способе индексации элементов на практике.

Для закрепления за элементом изображения особых свойств, предлагается ввести особую бинарную систему принадлежности ему того или иного свойства. У каждого элемента есть свойства, общие для всех элементов: «тип», расовая принадлежность, возрастная категория, пол. Под «типом» подразумевается название элемента: нос, уши, глаза и т.д. Каждый элемент имеет также индивидуальные характеристики, свойственные только

ему. В основе предлагаемой системы лежит представление свойств элемента в виде двух битовых масок, характеризующих его общие и индивидуальные свойства. Каждый бит в маске отвечает за наличие того или иного свойства. Подобное представление характеристик элементов позволяет отфильтровать огромную базу данных изображений. На основании словесного описания составляется общая и индивидуальные маски-фильтры (для каждого типа маска фильтрации своя), далее выполняется фильтрация элементов, подходящих под маски-фильтры. Если биты общей и индивидуальной маски элемента совпадают с соответствующими битами масок-фильтров, такой элемент проходит фильтр и участвует в последующей генерации фоторобота. Профильтровав все имеющиеся элементы, и найдя среди них те, которые соответствуют сформированным маскам, автоматически составляют различные комбинации фотороботов, имеющих в своем составе выбранные элементы.

Для хранения общих свойств элемента предлагается выделить 32 бита:

14 бит – тип элемента;

4 бита – расовая принадлежность;

5 бит – возрастная принадлежность;

2 бита – половая принадлежность.

Большинство элементов лица человека имеют «подтипы». Так, например, элемент «рот» имеет подтипы: «губы», «форма губ», «уголок рта». Каждый подтип имеет свои свойства: губы могут быть тонкими или толстыми, линия губ «в форме сердца», «косые губы», «заячья губа», а уголок рта может быть направлен вверх или вниз. Предлагается следующая система бит:

29 бит – на значение бит в подтипе;

12 бит – на подтипы для типа.

Отметим, что распределение битов в подтипе индивидуально для каждого типа.

Описанный выше механизм фильтрации при достаточно подробном словесном описании позволяет получить 5-6 возможных вариантов для каждого из элементов лица. При наличии 14 элементов лица, можно получить  $6^{14}$  фотороботов (уникальных комбинаций элементов), отличающихся друг от друга только лишь одним элементом лица. Данное значение весьма велико. Идентификация по такому числу фотороботов с трудом осуществима на практике.

Решить проблему по уменьшению количества фотороботов предлагается следующим образом. В работе [5] установлено, что наиболее точно люди описывают «глаза», «рот» и «нос». Остальные детали лица играют в точности описания личности не такую важную роль. Предлагается использовать уникальные комбинации только из этих элементов, а остальные элементы фоторобота выбирать из отфильтрованного набора случайным образом. Желательно, чтобы выборка остальных элементов осуществлялась с достаточно большой дисперсией. В результате, при условии, что было

получено по 6 вариантам элементов для «глаз», «рта» и «носа», мы будем иметь  $6^3$  уникальных комбинаций. В общем случае, если количество вариантов для каждого типа разное, число уникальных комбинаций вычисляется по формуле:

$$A = \prod_{i=1}^n k_i, \quad (1)$$

где  $n$  – количество типов;

$k_i$  – количество вариантов  $i$ -того типа.

**Применение предложенного подхода.** Взяв за основу изложенные выше принципы, в рамках данной работы было разработано программное обеспечение на языке программирования Java, позволяющее составлять фотороботы на основе словесного описания и подвергать их идентификации (см. рис. 2).

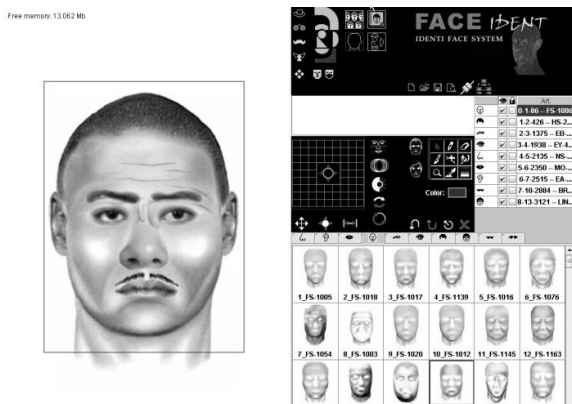


Рисунок 2– Рабочее окно программного обеспечения

В программном обеспечении также реализованы функции манипулирования элементами фоторобота – изменение их размера, яркостных характеристик, ориентации, а также элементы графического редактора для создания специальных эффектов отдельных изображений.

Для тестирования разработанного программного обеспечения была сформирована база данных из 136 различных лиц. Для формирования базы данных было задействовано 34 человека. Для формирования элементов фотороботов было задействовано 3096 изображений различных элементов лица. Было сформировано 10 различных словесных описаний личностей, имеющихся в тренировочной базе данных лиц. В 9-ти из 10-ти случаев среди предложенных системой наиболее похожих на фотороботы лиц из

тренировочной базы находилось изображение лица, по которому составлялось исходное описание (рис. 3).

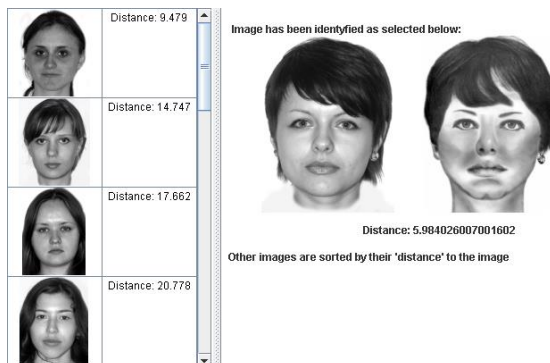


Рисунок 3– Результаты идентификации

**Заключение.** Результаты исследования говорят о том, что описанный подход к идентификации применим на практике, и дает весьма хорошее первое приближение к точному результату идентификации. Отдельного внимания заслуживает исследование возможности получения минимального набора уникальных фотороботов, описывающих наибольшую часть дисперсии отдельных черт лица человека. Разработанное программное обеспечение может стать весьма полезным в работе с большими (имеющими более  $10^4$  изображений лиц) базами данных. Следует, однако, отметить, что в любом случае, окончательное решение об идентификации той или иной личности следует принимать человеку, использующему разработанный программный комплекс.

**Список литературы:** 1. Turk M., Pentland A. Eigenfaces for Recognition // Journal of Cognitive Neuroscience.– 1991.– vol.3.– №1.– p.71-86. 2. Hancock P.J.B., Bruce V., Burton A. M. Recognition of unfamiliar faces // Trends in Cognitive Sciences.– 2000.– vol.4.– p.330-337 3. Frowd C.D., Bruce V., McIntyre A. Adding holistic dimensions to a facial composite system // Papers of 7th International Conference Automatic Face and Gesture Recognition.– 2006.– p.183-188 4. Nicola B., Graham P. Does the presentation of multiple facial composites improve suspect identification? // Applied Cognitive Psychology.– 2004.– vol.20.– p.213-226 5. MacLin O.H., Tapscott R.L., Malpass R.S. The development of a computer system to collect descriptions of culprits // Applied Cognitive Psychology.– 2002.– vol.16.– p.937-945

Поступила в редколлегию 10.04.07

*Л. Б. КАЩЕЕВ*, канд. техн. наук,  
*Т. Н. ШКАФЕНКО*, студентка НТУ «ХПИ»

## **КЛАСТЕРИЗАЦИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ ПРОМЫШЛЕННЫХ И СОЦИАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ**

В статті розглянута задача розподілу на класи екологічно небезпечних об'єктів промислової зони з використанням алгоритмів дендритів та навчання без вчителя. Розраховуються функціонали якості розподілу та робляться висновки про їх переваги та недоліки для цієї задачі.

В статье рассмотрена задача кластеризации экологически опасных объектов промышленной зоны с использованием алгоритмов дендритов и обучения без учителя. Рассчитаны функционалы качества разбиения и сделаны выводы про их преимущества и недостатки для данной задачи.

In the article the task of breaking up is considered on classes ecologically dangerous objects of industrial area with the use of algorithms of dendrites and teaching without a teacher. The functional of quality of breaking up are expected and the proper conclusions are done about their advantages and failings for this task.

**Введение.** Загрязнение окружающей среды в настоящее время является одной из важнейших проблем. Для ее решения необходимо решить задачу одновременного контроля множества факторов загрязнения, каждый из которых ограничен соответствующей санитарной нормой (СНИП). Тем не менее, контролировать каждый из этих факторов достаточно дорого. Поэтому на основании многолетних наблюдений желательнее выделить некоторые районы, области, участки улиц, цеха на предприятиях, в которых экологическая обстановка вызывает опасение. Разбиение по уровню загрязнения, позволяет оценить источники загрязнения и возможные штрафные санкциями, применяемыми к предприятиям.

Автоматизация процесса разбиения на классы предполагает реализацию следующего алгоритма – при каждом вводе новых данных перенос объектов из одного класса в другой. Подобные задачи относятся к разделу прикладной математики, именуемому «кластерный анализ». Классы, полученные после разбиения, могут служить критерием того, как часто необходимо производить проверки объектов.

**Постановка задачи.** Рассматриваются контрольные точки, на которых производились измерения и источники загрязнения. Количество точек ограничено 2,5–3 тысячами. В каждой точке контролируется не менее двух факторов загрязненности. Требуется разбить точки на  $n$  классов близкой загрязненности ( $n > 2$ ).

В качестве входных данных используются реальные данные по бензину, керосину, сероводороду в контрольных точках, а также о влиянии на них источников загрязнения. Исходные данные хранятся в базе данных (dbf-



файл). Пользователь устанавливает количество классов разбиения, если необходимо точки, входящие в обучающую выборку. На выходе получается цифровой атрибут принадлежности к тому или иному классу загрязненности. Группирование объектов по числовым параметрам, физический смысл и приоритеты которых определены санитарными нормами.

**Подготовка данных к кластеризации.** Числовые данные формируются в результате системы запросов из таблиц базы данных. Признаки, включенные в матрицу наблюдений, неоднородны, поскольку описывают разные свойства объектов. Данные нормализуются, то есть распределяются в промежутке от 0 до 1 по формуле (1).

$$x_{new} = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}. \quad (1)$$

После этого переходят к расчету элементов матрицы расстояний с учетом всех элементов матрицы наблюдений. Понятие расстояния позволяет оценить степень сходства между отдельными реализациями и между классами.

Чаще всего используются:  $d_1$  — евклидово расстояние

$$d_1(\bar{X}_i, \bar{X}_j) = \sqrt{\sum_{k=1}^n |x_{ik} - x_{jk}|^2}; \quad (2)$$

$d_2$  — расстояние по Манхэттену или метрика «городских кварталов» (для этой меры влияние отдельных больших разностей уменьшается, так как они не возводятся в квадрат). Это расстояние вычисляется по формуле:

$$d_2(\bar{X}_i, \bar{X}_j) = \sum_{k=1}^n |x_{ik} - x_{jk}|; \quad (3)$$

$d_3$  — расстояние Чебышева, это расстояние может оказаться полезным, когда желают определить два объекта как "различные", если они различаются по какой-либо одной координате; оно вычисляется по формуле:

$$d_3(\bar{X}_i, \bar{X}_j) = \max_k |x_{ik} - x_{jk}|. \quad (4)$$

**Описание и практическая реализация алгоритма обучения.** В задачу обучения входит постепенное усовершенствование алгоритма разделения предъявляемых объектов на классы. С этой целью отбирают часть предъявляемых объектов и используют их, в процессе обучения для «тренировки» системы.

Массив исходных данных в обучаемой системе состоит из двух частей: обучающей выборки и тестовой выборки, используемой в процессе испытаний. Главная особенность контролируемого метода классификации заключается в неперенном наличии «априорных» сведений о

принадлежности к определенному классу каждого вектора измерений, входящего в обучающую выборку. Таким образом, получают множество векторов измерений от источников, принадлежность которых к определенному классу заранее известна. Данный метод является наиболее приемлемым для решения задачи классификации экологически опасных объектов по степени опасности.

Метод дендритов заключается в том, что из дендрита, построенного на единицах разбиваемого множества, удаляется  $n-1$  самых длинных связей. Тем самым получается разбиение дендрита (и единиц множества) на  $n$  заранее заданных частей. Полученное разбиение есть в некотором смысле наилучшее, потому что дендриты, построенные на элементах выделенных  $n$  частей, характеризуются минимальной суммой образующих их отрезков. Полученные подмножества, следовательно, включают элементы с близкими значениями признаков. В качестве метрики используется Евклидово пространство. В данной работе используется возведенное в квадрат евклидово расстояние. Такое расстояние придает большие веса более отдаленным друг от друга объектам.

Находится остевое дерево минимальной длины. Определяется число вершин, составляется матрица расстояний. Затем выбирается ребро минимальной длины, которое еще не было выбрано, при условии, что оно не образует цикла с уже выбранными. Для этого до построения дерева каждая вершина  $i$  окрашивается в отличный от других цвет. При выборе очередного ребра, где  $i$  и  $j$  имеют разные цвета, вершина  $j$  и все, окрашенные в ее цвет перекрашиваются в цвет  $i$ . Таким образом, выбор вершин разного цвета обеспечивает отсутствие циклов. После выбора  $n-1$  ребер все вершины получают один цвет. Последняя связь приводит к перекрашиванию всех ребер в один цвет. Длина этого ребра наибольшая из длин ребер, которые составляют минимальный каркас, поэтому при разбиении на  $m$  классов не закрашиваются последние  $m$  ребер. В результате вершины, соединенные ребрами различных цветов, принадлежат различным классам.

Для оценки полученного решения использован функционал качества разбиения  $F(S)$ , определяемый на множестве всех возможных разбиений. Наилучшим разбиением  $S$  понимается то, на котором достигается экстремум функционала. В качестве функционалов часто используются такие характеристики:

– средние внутриклассовые расстояния

$$F1(S) = \left( \sum_{i,j \in S_i} d_{ij} \right) / \left( \sum_{l=1}^k n_l^2 \right), \quad (5)$$

– средние межклассовые расстояния.

$$F2(S) = \left( \sum_{i \in s_l, j \in s_q} d_{ij} \right) / \left( \sum_{l < q} n_l \cdot n_q \right). \quad (6)$$

В этих формулах  $n_l, n_q$  – число объектов в классах;  $l, q$  – номера классов;  $k$  – число классов;  $d_{ij}$  – расстояние между  $i$  и  $j$  объектами;  $s_l, s_q$  – классы.

Таблица данных

Кол-во классов	Минимум функционала F1		Максимум функционала F2	
	Дендриты	Обучение	Дендриты	Обучение
5	0.03	0.02	0.73	0.70
4	0.02	0.01	0.84	0.76
3	0.03	0.03	0.83	0.72

В зависимости от того, чего хочет достичь пользователь (наибольшей компактности – F1, либо наибольшего различия между классами – F2) выбирается соответствующий метод. Для достижения наибольшей компактности лучше использовать метод обучения, для наибольшего различия между классами – метод дендритов.

**Выводы.** В статье рассмотрена методика группирования многопараметрических объектов. Описана реализация таких методов, как обучение и метод дендритов (Вроцлавская таксономия). Для сравнения методов использованы такие функционалы качества как средние внутриклассовые расстояния и средние межклассовые расстояния. Решена проблема выбора метода для данной экологической задачи.

**Список литературы:** 1. Айвазян С. А., Бежаева З. И., Староверов О. В. Классификация многомерных наблюдений. – М.: Статистика, 1974. – 238 с. 2. Андерсон Т. Введение в многомерный статистический анализ. – М.: Физматгиз, 1963. – 500 с. 3. Кендалл М. Дж., Стьюарт А. Статистические выводы и связи. – М.: Наука, 1973. – 899 с. 4. Орлов А. И. Прикладной многомерный статистический анализ. – М.: Наука, 1973. – 510 с. 5. Плюта В. Сравнительный многомерный анализ в экономических исследованиях. – М.: Статистика, 1980. – 150 с.

Поступила в редколлегию 05.04.07

*Л. Б. КАЩЕЕВ*, канд. техн. наук,  
*Т. С. ТЕЛЮПА*, студентка НТУ «ХПИ»

## ГРАФИЧЕСКОЕ ОТОБРАЖЕНИЕ ИТЕРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

У статті розглядається задача графічного відображення ітераційних процесів з комплексними числами. Розглядаються фрактальні зображення та їх практичне використання. Приділяється увага деяким ітераційним зображенням, подібним до примітивних біологічних структур.

В статье рассмотрена задача графического отображения итерационных процессов на комплексных числах. Рассматриваются фрактальные изображения и практическое применение. Уделено внимание итерационным изображениям, похожих на примитивные биологические структуры.

In the article is considered the task of graphic image of iteration processes on complex numbers. The images of fractals and practical application are examined. Attention iteration images are spared, look like primitive biological structures.

**Введение.** Увеличение вычислительной мощности персональных компьютеров позволяет практически реализовать все более сложные итерационные алгоритмы. Для многих из подобных задач (фракталы, L-системы и пр.) представляет интерес графическое отображение результатов.

**Постановка задачи.** Визуализация итерационных вычислений помогает оценить динамику хода процесса, очертить область интересующих нас результатов и в ряде случаев просто получить красивый зрительный образ. В этом плане наиболее интересными итерационными отображениями являются фрактальные изображения, получаемые при помощи многократно повторяемых действий над комплексными числами.

**Описание алгоритма.** Для построения простейшего фрактала на комплексной плоскости по горизонтальной оси откладывать реальные числа, а по вертикальной мнимые; каждому комплексному числу будет соответствовать точка на этой плоскости. Выбранное число возводится в квадрат и прибавляется какое-то фиксированное постоянное число. Это число тоже комплексное, то есть имеет действительную и мнимую части, подбирая которые мы можем регулировать процесс, получая самые причудливые картины. В зависимости от начального числа могут быть три варианта [1, 2]:

Модуль числа возрастает, уходит в бесконечность.

Модуль числа уменьшается и стремится к нулю.

При определенных начальных значениях модуль нового числа продолжает оставаться на некотором расстоянии от границы двух областей притяжения, а при отображении чисел на плоскости появляются специфические изображения.

Интересную форму группирования возводимых в квадрат комплексных чисел впервые подметил и описал Жюлиа в 1916 году [2, 3]. Простейшая итерационная формула

$$Z_{нов} = Z_{стар}^2 + C \quad (1)$$

соответствует так называемому множеству Жюлиа, рис.1.



Рисунок 1 – Множество Жюлиа

Множество Жулиа послужило отправной точкой для Бенуа Р. Мандельброта [3], математика из Исследовательского центра им. Томаса Уотстона при ИВМ, предложившего термин «фрактал» для описания объектов, структура которых повторяется при переходе к все более мелким масштабам.

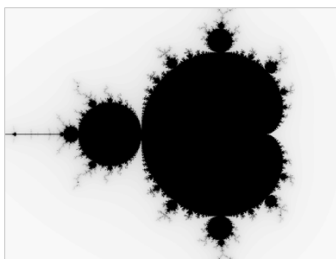


Рисунок 2 – Множество Мандельброта

Спектр применения фракталов довольно-таки обширен. Фракталами хорошо описываются процессы, относящиеся к механике жидкостей и газов. В химии с их помощью можно охарактеризовать процесс наращивания кристаллов. Также достаточно велика роль фракталов в машинной графике при генерации изображений природных объектов, существуют эффективные алгоритмы для сжатия изображения при помощи фракталов. Фракталы связаны и с биологией. Они применяются при моделировании популяций и исследовании процессов внутри организма (например, клеточное деление, биение сердца и др.) [3, 4].

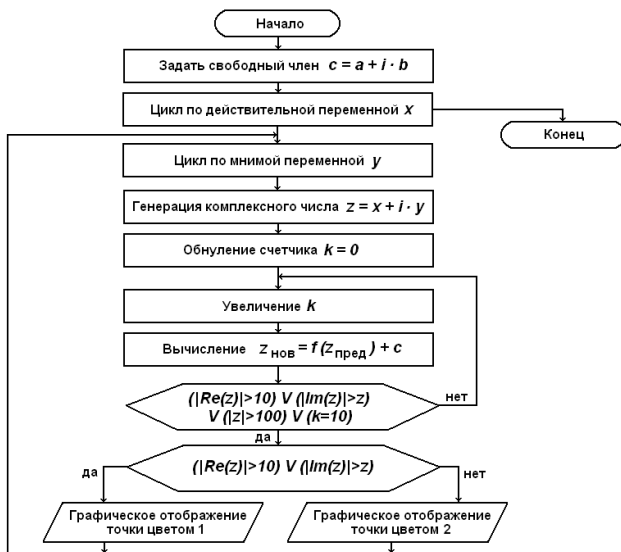


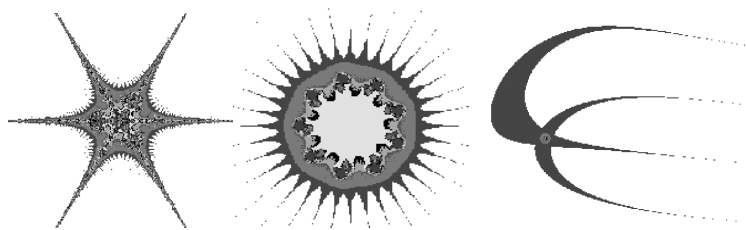
Рисунок 3 – Итерационный алгоритм построения фрактала

Графическое отображение некоторых фрактальных рисунков похоже на клеточные организмы. Это так называемые «биоморфы». Исследуя их можно изучать законы жизни моделируемых организмов, открывая у них черты, присущие настоящим клеткам. Известным исследователем этих причудливых и красивых графических объектов является К. Пикоувера, ученый из Исследовательского центра им. Томаса Уотсона в Йорктаун-Хейтсе.

Рассмотрим подробнее понятие биоморф. Это слово означает нечто похожее на живой организм. Биоморфы Пикоувера населяют комплексную плоскость. Каждый биоморф строится путем многочисленных итераций, или последовательных вычислений определенной математической функции, путем повторяющихся математических операций. На каждом шаге итерационного процесса результат предыдущего шага принимается за исходное значение переменной, то есть

$$z_{n+1} = f(z_n). \quad (2)$$

Рассмотрим, например, биоморфы на рис.2. Можно использовать также другие формулы, которые будут влиять на общий вид биоморфа. Помимо приведенных на рис. 4 можно назвать  $z_{n+1} = \sin(z_n) + e^{z_n} + c$ ;  $z_{n+1} = z_n^5 + e^{z_n} + c$ ;  $z_{n+1} = \sin(z_n) + z_n^2 + c$  и многие другие.



$$z_{n+1} = \sin(z_n^3) + c,$$

$$z_{n+1} = z_n^9 + c,$$

$$z_{n+1} = z_n^z + z_n^3 + c$$

Рисунок 4 – Биоморфы

Биоморфы на самом деле представляют собой сокращенную и по-другому раскрашенную версию множества Жюлиа. Пиковер обнаружил биоморфы из-за ошибки в своей программе, с помощью которой он исследовал фрактальные свойства комплексных функций. Вместо *and* в процедуре принятия решения окраски точки белым или черным цветом он по ошибке написал *or*, из-за чего гораздо большее количество точек было окрашено в черный цвет. В частности, реснички и жгутики биоморфов состоят именно из таких точек.

**Выводы.** Начавшись как ошибка, процесс нахождения и исследования биоморфов со временем превратился в самостоятельное направление фрактальной математики. Вполне возможно, что биоморфы не только эффектно описывают внешний вид примитивных биологических объектов. В качестве гипотезы можно предположить, что внешний вид “неповторимых природных объектов” обусловлен тем, что их рост и размножение подчинено законам фрактальной математики. В любом случае компьютеры являются не только инструментом для математических расчетов в биологии, но и позволяют создавать виртуальные организмы с заданными свойствами. На данный момент существует большой математико-компьютерный потенциал для исследования живых организмов и их поведения, не последнее место в котором занимают итерационные вычисления.

**Список литературы:** 1. Морозов А. Д. Введение в теорию фракталов.– Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. – 160 с. 2. Федер Е. Фракталы. Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 254 с. 3. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. – М: Институт компьютерных исследований, 2002, 656с. 4. Пайтген Х.-О., Рихтер П. Х. Красота фракталов. Образы комплексных систем. – М.: Мир, 1993, 176 с.

Поступила в редколлегию 05.04.07

**В. П. ПУЛЯТИН**, д-р. техн. наук, зав. каф. кибернетики ХНТУСХ  
им. П. Василенко,  
**С. Н. КОВАЛЕНКО**, ассистент ХНТУСХ им. П. Василенко

## **КОМБИНАТОРНЫЕ АППАРАТНЫЕ МОДЕЛИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ**

Пропонуються структури та склад блоків спеціалізованих цифрових обчислювальних пристроїв для підвищення ефективності розв'язання комбінаторних задач оптимізації. Основна увага приділяється принципам синтезу блоків селекції елементів комбінаторних множин за обмеженнями їх недопустимості або переваг одних елементів над іншими. Це дає змогу виділити область допустимого розв'язку задачі, на якій у подальшому здійснюється оптимізація відповідної функції мети.

Предлагаются структуры и состав блоков специализированных цифровых вычислительных устройств для повышения эффективности решения комбинаторных задач оптимизации. Основное внимание уделяется принципам синтеза блоков селекции элементов комбинаторных множеств по ограничениям их недопустимости или предпочтения одних элементов над другими. Это дает возможность выделить область допустимого решения задачи, на которой в дальнейшем осуществляется оптимизация соответствующей функции цели.

The structures and composition of blocks of special-purpose numerical computing devices for enhancement of efficiency of deciding the combinatorial problems to optimization are proposed. The main attention gives to principles a synthesis of blocks of selection of combinatorial elements on their inadmissibility restrictions or preference of one element on the others. This enables to select an area of possible deciding a problem, to which is hereinafter realized optimization corresponding criterion functional.

**Постановка проблемы.** Многие прикладные задачи имеют дискретную природу и связаны с необходимостью формирования и анализа соответствующих элементов комбинаторных множеств [1 – 9]. Причем, анализ этих элементов необходимо проводить с учетом заранее заданных ограничений на их недопустимость, или с учетом рекомендаций в виде предпочтений одних элементов комбинаторного множества над другими. Поиск наилучшего элемента такого комбинаторного множества необходимо осуществлять с учетом оптимизации соответствующей функции цели.

**Анализ исследований и публикаций.** Общим вопросам разработки аппаратных средств для автоматизации решения комбинаторных задач оптимизации с ограничениями посвящена монография [1]. Комбинаторные задачи формирования комплексов сельхозмашин для выполнения сельскохозяйственных работ рассматривались в работе [2], задача назначения сельскохозяйственной техники на выполнение полевых работ – в работе [3], планирование очередности севооборотов сельскохозяйственных культур – в работах [4, 5, 6, 8, 9]. Вычислительные аспекты перечисленных выше вопросов исследовались в работах [8 – 9].



**Цель настоящего исследования.** Основной задачей является создание общего подхода к разработке специализированных цифровых вычислительных устройств, которые бы давали возможность повысить эффективность (по затратам памяти, затратам времени и точности) решения соответствующих комбинаторных задач с ограничениями. При этом сокращение временных затрат может быть достигнуто за счет: отсутствия этапов составления и отладки программ и, кроме того, аппаратных (крупно блочных) реализаций подпрограмм решения задач комбинаторной оптимизации. Такое аппаратное обеспечение позволит повысить уровень автоматизации процесса исследования математических моделей.

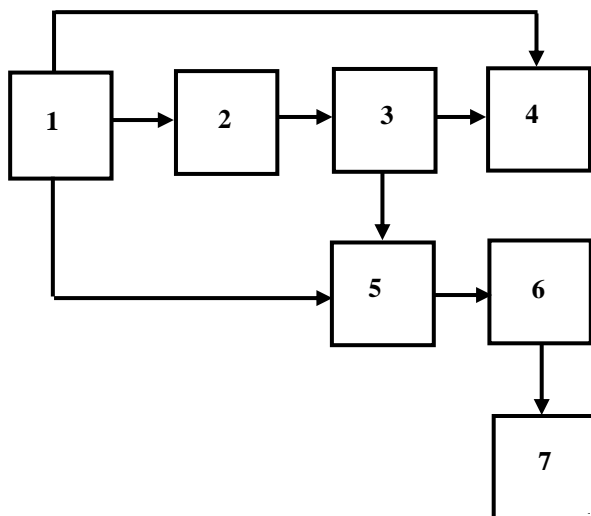


Рис. 1 – Структура и состав блоков аппаратной реализации математической модели задачи комбинаторной оптимизации

**Концепция аппаратной реализации математических моделей.** Основными этапами численной реализации рассматриваемых задач [8, 9], являются следующие: ввод исходных данных; задание вида функции цели; задание ограничений на недопустимость или предпочтение элементов базовых комбинаторных множеств; генерирование элементов базовых комбинаторных множеств; селекция элементов комбинаторных множеств по ограничениям недопустимости или предпочтения; формирование области допустимых решений; реализация процедуры поиска локального экстремума; реализация процедуры поиска глобального экстремума; вывод результатов решения задачи (одного или нескольких рациональных решений); принятие экспертом окончательного решения.

Приведенные выше этапы численного исследования рассматриваемых оптимизационных задач, в наиболее общем случае могут быть реализованы в виде следующей структуры специализированного процессора (рис. 1), где: блок 1 ввода информации; блок 2 перебора перестановок, сочетаний или размещений; блок 3 селектор элементов комбинаторного множества; блок 4 задания ограничений или предпочтений; блок 5 расчета значений функции цели; блок 6 определения экстремального значения функции цели; блок 7 регистрации.

В качестве блока 2 перебора перестановок, сочетаний или размещений может быть применено устройство [7]. Реализация блоков 1, 3 – 7, как правило, зависит от конкретной решаемой задачи.

Реализация на устройстве (рис. 1) оптимизационной задачи заключается в следующем. Блок 1 ввода информации позволяет задать: информацию о типе (перестановки, сочетания, размещения и др.) элементов комбинаторного множества; необходимые величины для формирования этих элементов; ограничения на недопустимость или предпочтение элементов комбинаторных множеств; критерии селекции этих элементов по ограничениям недопустимости или предпочтения; критерий окончания поиска рационального значения функции цели.

Блок 2 осуществляет генерирование соответствующих элементов комбинаторного множества (перестановки, сочетания, размещения и др.). Все полученные элементы этих дискретных множеств анализируются блоком 3 – селектором элементов комбинаторного множества, на основе заданных в блоке 4 ограничений на недопустимость или предпочтение этих элементов. Это дает возможность осуществить выделение подмножества допустимых элементов базового комбинаторного множества. Для каждого такого допустимого элемента в блоке 5 рассчитывается значение функции цели. В блоке 6 определяется рекордное значение функции цели, которое регистрируется блоком 7.

**Пример реализации на устройстве (рис. 1) задачи оптимизации севооборота сельскохозяйственных культур.** Рассмотрим задачу об оптимизации севооборота сельскохозяйственных культур. На  $n$  полях планируется выращивать  $m$  культур, при этом возможные следующие случаи:  $n=m$ ;  $n>m$ ;  $n<m$ . Не исключается также выращивание одной культуры на нескольких полях одновременно и необходимо учесть наличие чистых паров. Целью принятия решения о рациональном севообороте на один или несколько лет вперед является максимизация прибыли от реализации выращенной сельскохозяйственной продукции.

Для реализации на устройстве (рис. 1) этой задачи, в блоке 1 осуществляется формирование базы данных о площадях полей, средней урожайности культур для определенного региона, вариантах севооборотов предыдущих лет, рекомендаций на недопустимость или предпочтительность

чередования сельскохозяйственных культур, природно-климатические факторы.

Все полученные в блоке 2 элементы комбинаторного множества, которые представляют собой варианты севооборотов, анализируются в блоке 3 селектора элементов комбинаторного множества посредством задаваемых блоком 4 ограничений на варианты севооборотов. Это дает возможность осуществить селекцию вариантов севооборотов и выделить подмножество допустимых. Для каждого такого допустимого варианта севооборота, с учетом известных площадей полей, средней урожайности для определенного региона и стоимости реализации сельскохозяйственной продукции, в блоке 5 рассчитывается прибыль от реализации продукции. По результатам подсчета прибыли, в блоке 6 выделяется максимальная прибыль и соответствующий ей наилучший вариант севооборота, а блок регистрации 7 фиксирует эти значения.

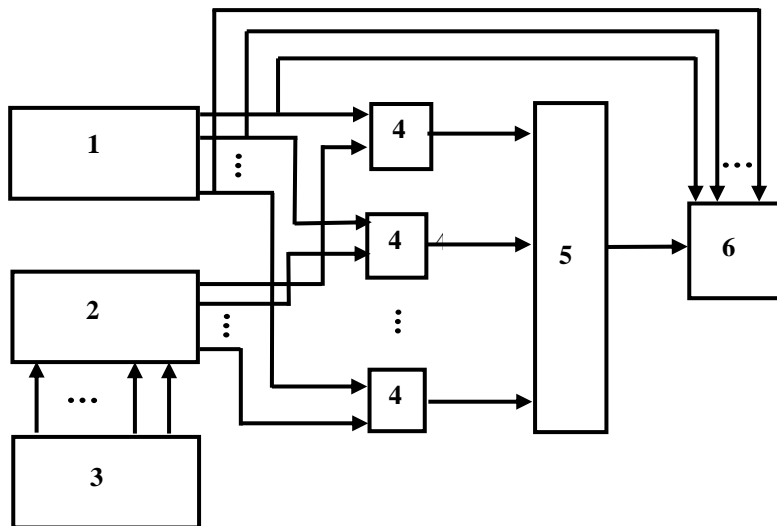


Рис. 2 – Структура и состав блоков для аппаратной реализации операции селекции элементов комбинаторного множества

**Аппаратурная реализация операции селекции элементов комбинаторных множеств по ограничениям.** Соответствующее устройство [4] реализуется следующим образом. На рис. 2 приведена структура, состав блоков и их соединения для аппаратной реализации операции селекции элементов комбинаторных множеств по заданной системе ограничений.

Устройство состоит из: блока 1 генерирования сочетаний, размещений и перестановок; блока 2 задания ограничивающих элементов комбинаторного множества; блока 3 ввода значений ограничивающих элементов множеств; элементов 4 *И*; элемента 5 *И*; блока 6 регистрации. При этом блок 1 генерирования элементов комбинаторного множества настраивается на выполнение перебора или сочетаний, или размещений, или перестановок.

С блока 3 к блоку 2 задания ограничений вводятся значения запрещенных элементов соответствующего комбинаторного множества. Каждый элемент комбинаторного множества, который поступает с блока 1, поразрядно сравнивается с элементами, которые поступают с блока 2. Это осуществляется с помощью элементов 4 *И*, и общего сравнения элементов комбинаторного множества с помощью элемента 5 *И*. Если имеет место совпадение, то с выхода элемента 5 *И* поступит к блоку 6 регистрации сигнал, который запрещает регистрацию этого элемента комбинаторного множества. В противном случае блок регистрации 6 фиксирует с блока 1 допустимый элемент комбинаторного множества.

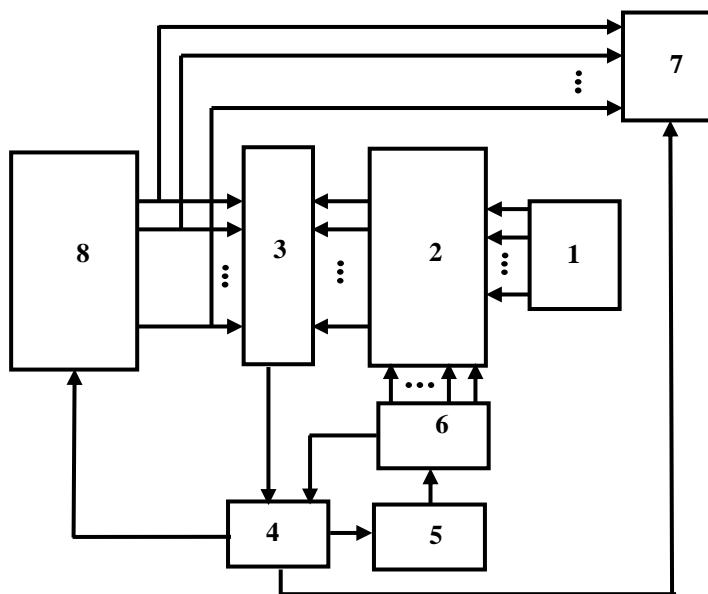


Рис. 3 – Структура и состав блоков аппаратной реализации операции селекции элементов комбинаторного множества по заданным ограничениям

Приведенное на рис. 3 устройство [5] также предназначено для реализации комбинаторных задач оптимизации с учетом заданных

ограничений на элементы этих комбинаторных множеств. Применение устройства [5] позволяет осуществить анализ элементов базовых комбинаторных множеств и выделить из них только те, которые удовлетворяют заранее заданным ограничениям.

Устройство [5] (рис. 3) состоит из: блока 1 ввода значений запрещенных элементов комбинаторного множества; блока 2 задания ограничивающих элементов комбинаторного множества; блока 3 сравнения; блока 4 управления; генератора 5 тактовых импульсов; счетчика 6; блока регистрации 7; блока 8 перебора сочетаний, размещений и перестановок.

Устройство функционирует следующим образом. Блок 8 [7] перебора элементов комбинаторного множества настраивается на генерирование или сочетаний, или размещений, или перестановок. Далее с блока 1 ввода значений запрещенных элементов комбинаторного множества, к блоку 2 задания ограничивающих элементов множества, вводятся ограничения на элементы этого множества. Каждый элемент комбинаторного множества, поступающий с блока 8 перебора сочетаний, размещений или перестановок, сравнивается с элементами, поступающими с блока 2 задания ограничивающих элементов этого множества. Если имеет место совпадение элементов, то с выхода блока 3 сравнения подается сигнал на блок 4 управления, который в свою очередь подает сигнал к блоку 7 регистрации и запрещает фиксацию этого элемента. Кроме того, этот же сигнал подается и на генератор 5 тактовых импульсов, который запрещает подачу тактовых импульсов на счетчик 6, что в свою очередь останавливает последующее сравнение запрещенных элементов комбинаторного множества с элементом, поступившим с блока 8 генерирования элементов комбинаторного множества. С выхода счетчика 6 поступает сигнал на вход блока 4 управления, что является требованием генерирования следующего элемента комбинаторного множества. Это осуществляется благодаря подаче соответствующего сигнала с блока 4 управления к блоку 8 генерирования элементов комбинаторного множества. Далее аналогично осуществляется анализ совпадения элементов комбинаторного множества с запрещенными элементами. Если нет совпадения ни с одним запрещенным элементом, то с блока 4 управления подается сигнал к блоку 7 регистрации, который позволяет осуществить фиксацию элемента комбинаторного множества, который не совпадает ни с одним запрещенным элементом.

**Аппаратурная реализация математических моделей задач комбинаторной оптимизации с ограничениями.** Устройство (рис. 4) состоит из: генератора 1 тактовых импульсов; элемента 2 задержки; информационного регистра 3; постоянной памяти 4; регистра 5 сдвига; счетчика 6; блока 7 памяти; блока 8 совпадения; блока 9 расчета функции цели; блока 10 выделения экстремального значения функции цели; блока 11 регистрации; блока 12 ввода информации.

Начальная информация об ограничениях на элементы базовых комбинаторных множеств вводится блоком 12 ввода информации к блоку 7 памяти. Генератор 1 тактовых импульсов обеспечивает подачу тактовых импульсов к регистру 5 сдвига, а через элемент 2 задержки к информационному регистру 3, и через элемент задержки 6 к блоку 7 постоянной памяти. При этом элемент задержки 6 обеспечивает подачу с блока 7 памяти к блоку 8 совпадения всех элементов комбинаторного множества, запрещенных заранее заданными ограничениями. Регистр 5 сдвига, блок 4 постоянной памяти и информационный регистр 3 обеспечивают генерирование элементов комбинаторного множества и подачу их к блоку 8 совпадения

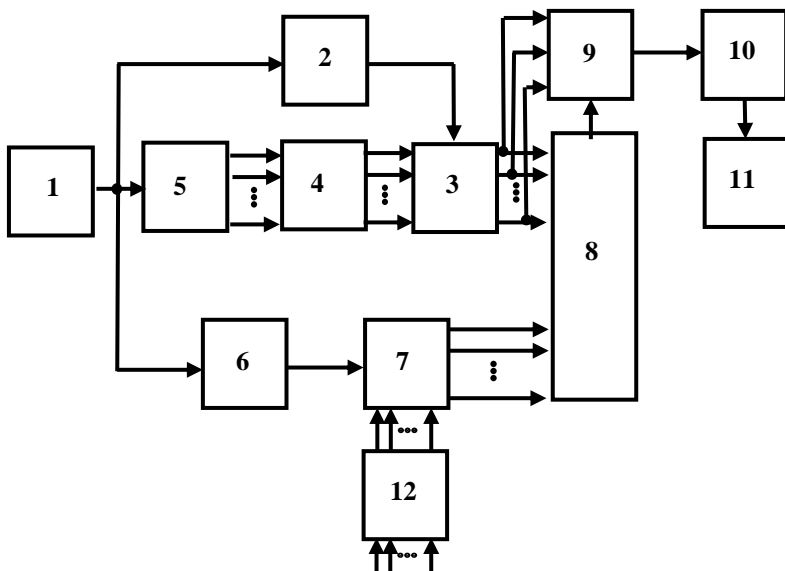


Рис. 4 – Структура и состав блоков аппаратной реализации математических моделей задач комбинаторной оптимизации

Таким образом, к блоку 8 совпадения поступают последовательно по одному элементу определенного комбинаторного множества. Каждый такой элемент комбинаторного множества сравнивается последовательно со всеми запрещенными элементами, поступающими с блока 7 памяти. Если поданные в блок 8 элементы одинаковы, то блок 8 совпадения подает импульс к блоку 9 расчета функции цели, который отключает последующий вычислительный процесс. Если элемент комбинаторного множества, поступивший в блок 8 не совпадает ни с одним запрещенным элементом, поступающим с блока 7

памяти, то блок 9 вычисляет и запоминает значение функции цели для этого элемента комбинаторного множества. Полученные в блоке 9 значения функции цели подаются в блок 10 выделения экстремального значения функции цели. Затем наилучшее значение функции цели и соответствующий элемент комбинаторного множества фиксируется блоком 11 регистрации.

**Выводы.** Предложена структура и состав блоков для аппаратурной реализации математической модели оптимизационной задач комбинаторного типа с ограничениями.

Для аппаратурной реализации операции селекции элементов базовых комбинаторных множеств, по заданной системе ограничений, предложены соответствующие способ и устройство. Их применение позволяет осуществить выделение области допустимых решений, на которой проводится оптимизация функции цели.

Это позволяет сократить временные затраты за счет отсутствия этапов составления и отладки программ, параллельности выполнения на устройствах некоторых шагов алгоритма, а также аппаратных реализаций подпрограмм решения задач комбинаторной оптимизации.

Кроме того, применение предложенных устройств дает возможность имитационного моделирования и автоматизации процесса исследования математических моделей задач комбинаторной оптимизации с учетом многообразия ограничивающих факторов.

**Список литературы:** 1. Курейчик В. М., Глушань В. М., Щербаков Л. И. Комбинаторные аппаратные модели и алгоритмы в САПР. – Москва: Радио и связь. 1990. – 120 с. 2. Патент. № 47901 А. Україна, МКИ А 01 В 49/00. Спосіб визначення раціонального складу агрегатів для польових робіт / В. І. Пастухов, В. П. Путятін (Україна). – Заявл. 22.10.2001; Опубл. 15.07.2002. Бюл. № 7. – 3 с. 3. Патент. № 48638 А. Україна, МКИ G 06 F 15/00. Пристрій для моделювання графа агротехнологічного процесу / В. І. Пастухов, В. П. Путятін (Україна). – Заявл. 30.10.2001; Опубл. 15.08.2002. Бюл. № 8. – 3 с. 4. Патент. № u 2006 10634. Україна, МКИ G 06 F 15/20. Спосіб виділення допустимих елементів комбінаторних множин / С.М. Коваленко, В.П. Путятін (Україна). – Заявл. 09.10.06; Пріор. 25.12.06. – 6 с. 5. Патент. № u 2006 11118. Україна, МКИ G 06 F 15/20. Селектор елементів комбінаторних множин. / С. М. Коваленко, В. П. Путятін, І.О. Фурман (Україна). – Заявл. 23.10.06; Пріор. 22.12.06. – 6 с. 6. Патент. № u 2006 10651. Україна, МКИ G 06 F 15/20. Пристрій для комбінаторної оптимізації / С.М. Коваленко, В.П. Путятін (Україна). – Заявл. 09.10.06; Пріор. 01.03.06. – 6 с. 7. Устройство для перебора сочетаний, размещений и перестановок: Авт. св. № 643883. СССР, МКИ G 06 F 15/20. / Левин Г. И. (СССР) – Заявл. 10.01.1977; Опубл. 25.01.1979. Бюл. № 3 – 4 с. 8. Коваленко С. Н. Комбинаторные задачи принятия решений о рациональном севообороте: Труды конференции «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». – Харьков: ХНУРЭ. – 2006. – с.418. 9. Коваленко С. М., Пастухов В. І., Путятін В. П. Комп'ютерні комбінаторні моделі в САПР АПК // Управління розвитком. Збірник наукових статей. – Харків: ХНЕУ. – 2006. – №б. - С. 73 – 74.

Поступила в редколлегию 26.03.07

**О. В. СЕРАЯ**, канд. техн. наук, доцент НТУ «ХПИ»  
**АМЕР ШАДИ**, аспирант НТУ «ХПИ»

## МОДЕЛЬ ОТКАЗОВ ДЕГРАДИРУЮЩИХ СИСТЕМ

Запропоновано математичну модель відмов системи, в підсистемах якої протікають різні залежні деградаційні процеси. Отримано співвідношення для розрахунку вірогідності безвідмовної роботи системи на інтервалі заданої довжини.

Предложена математическая модель отказов системы, в подсистемах которой протекают различные зависимые деградационные процессы. Получено соотношение для расчета вероятности безотказной работы системы на интервале заданной длины.

The mathematical failure pattern of the system is offered. There are different dependent degradations processes in the subsystems of this system. Design formula for faultness probability of the system on the interval of the set length is got.

**Введение.** Оценка и прогнозирование вероятности безотказной работы оборудования в течение заданного временного интервала – стандартная задача практики эксплуатации техники. Для решения этой задачи необходимо знать плотность распределения случайной продолжительности безотказной работы, параметры которой зависят от численного значения факторов, задающих условия и режим эксплуатации оборудования. Задача отыскания этих зависимостей не тривиальна и осложняется следующими обстоятельствами. Современное оборудование представляет собой сложный комплекс разных по типу и взаимодействующих в процессе функционирования элементов, безотказность которых по разному зависит от эксплуатационных факторов. Поэтому процессы старения, деградации, ухудшения надежности характеристик протекают различным образом в разных режимах эксплуатации. В связи с этим статистическое оценивание параметров плотностей распределения вынужденно реализуется, как правило, в условиях малой выборки. В этой ситуации принципиальную роль играет уровень адекватности моделей отказов исследуемой системы с учетом возможного влияния ненадежности одних подсистем на безотказность других.

Традиционно рассматривают два типа взаимодействия деградационных процессов, протекающих в подсистемах системы [1]: а) эти процессы развиваются независимо; б) процессы деградации зависимы. При этом характер зависимости обычно определяется следующим образом: показатели безотказности для одного из этих процессов ухудшаются скачком, как только другой из процессов в ходе деградации достигает некоторого предельного состояния. Введенное допущение не вполне адекватно отображает реальный характер взаимодействия зависимых деградационных процессов, прежде



всего потому, что в действительности постепенное ухудшение надежностных показателей для одного из процессов приводит к непрерывному, а не скачкообразному ухудшению этих показателей для зависимого процесса. Кроме того, следует отметить, что эксплуатационные факторы, в общем случае, по-разному влияют на численные значения параметров деградиационных процессов. Задача исследования надежностных показателей систем с учетом всех перечисленных обстоятельств в известной литературе не обсуждалась.

**Цель статьи** - разработка математической модели отказов системы, в подсистемах которой протекают разные зависимые деградиационные процессы с интенсивностью, определяемой значениями эксплуатационных факторов.

**Постановка задачи.** Пусть система состоит из двух подсистем. Для первой подсистемы введем независимый случайный деградиационный процесс  $\xi(\theta_\xi(t), t)$ , параметры которого  $\theta_\xi(t) = (\theta_{\xi_1}(t), \theta_{\xi_2}(t), \dots, \theta_{\xi_n}(t))$  определяются режимом эксплуатации системы и являются функциями времени. Кроме того, будем считать, что параметры другого деградиационного процесса  $\eta(\theta_\eta(t), t)$ , протекающего во второй подсистеме, известным образом зависят от параметров процесса  $\xi(\theta_\xi(t), t)$ , то есть  $\theta_\eta(t) = \varphi(\theta_\xi(t))$ . Поставим задачу построения модели отказов такой системы.

**Основные результаты.** Пусть относительно независимого случайного процесса  $\xi(\theta_\xi(t), t)$  известна совместная плотность распределения значений процесса и скорости изменения этих значений  $f_\xi(x(t), v(t))$ . Зададим диапазон допустимых значений процесса -  $[x_H, x_B]$ . Тогда, как показано, например, в [2], если  $\xi(0) \in [x_H, x_B]$ , то плотность вероятности невыхода за пределы допуска на интервале  $[0, t]$  определяется соотношением

$$q(t) = \int_0^\infty [f_\xi(x_H, v(t)) + f_\xi(x_B, v(t))] v(t) dv, \quad (1)$$

а вероятность невыхода процесса на этом интервале задается формулой

$$p_0(t) = \exp \left\{ - \int_0^t \int_0^\infty [f_\xi(x_H, v(t)) + f_\xi(x_B, v(t))] v(t) dv dt \right\}. \quad (2)$$

В частном случае, когда процесс  $\xi(t)$  - стационарный, выражение (2) упрощается к виду

$$p_0(t) = \exp \left\{ - t \int_0^\infty [f_\xi(x_H, v(t)) + f_\xi(x_B, v(t))] v(t) dv \right\}.$$

Будем считать теперь, что процесс  $\xi(\theta_\xi(t), t)$  - деградиционный, то есть это процесс с независимыми приращениями одного знака. При этом плотность распределения случайного интервала до первого выхода за поле допуска имеет вид [3]:

$$f_\xi(t) = -\left. \frac{d\Phi_\xi(x, t)}{dt} \right|_{x_H}^{x_B}, \quad \Phi_\xi(x, t) = P(\xi(t) < x). \quad (3)$$

Если  $\xi(t)$  - нормальный случайный процесс и

$$\Phi_\xi(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x(t)} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-m_x(t))^2}{2\sigma_x^2(t)}} dt,$$

то

$$f_\xi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x(t)} \left[ e^{-\frac{(x_B-m_x(t))^2}{2\sigma_x^2(t)}} (m'_x(t)\sigma_x(t) + \sigma'_x(t)(x_B - m_x(t))) - e^{-\frac{(x_H-m_x(t))^2}{2\sigma_x^2(t)}} (m'_x(t)\sigma_x(t) + \sigma'_x(t)(x_H - m_x(t))) \right]. \quad (4)$$

Пусть, например, процесс деградации протекает таким образом, что

$$m_x(t) = m_{0x} + K_{m_x} t, \quad \sigma_x(t) = K_{\sigma_x} t.$$

Тогда из (4) следует

$$f_\xi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}K_{\sigma_x}t^2} \left[ e^{-\frac{(x_B-m_{0x}-K_{m_x}t)^2}{2K_{\sigma_x}^2t^2}} (x_B - m_{0x}) - e^{-\frac{(x_H-m_{0x}-K_{m_x}t)^2}{2K_{\sigma_x}^2t^2}} (x_H - m_{x(t)}) \right]. \quad (5)$$

Будем далее считать, что другой деградиционный процесс  $\eta(t)$  также нормальный, причем его параметры зависят от параметров случайного процесса  $\xi(t)$  следующим образом:

$$\begin{aligned} m_y(t) &= m_{0y} + m_x(t)K_{m_y} t = m_{0y} + m_{0x}K_{m_y} t + K_{m_x}K_{m_y} t^2, \\ \sigma_y(t) &= m_x(t)K_{\sigma_y} t = m_{0x}K_{\sigma_y} t + K_{m_x}K_{\sigma_y} t^2, \end{aligned} \quad (6)$$

то есть скорость деградации для процесса  $\eta(t)$  зависит от режима эксплуатации второй подсистемы, а также от того, насколько деградировала первая подсистема.

Тогда из (4) с учетом (6) после несложных преобразований имеем

$$f_{\eta}(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi m_x^2(t) K_{\sigma_y} t^2}} \left[ e^{-\frac{(x_B - m_{0y} - m_{0x} K_{m_y} t - K_{m_x} K_{m_y} t^2)^2}{2(m_{0x} K_{\sigma_y} t + K_{m_x} K_{\sigma_y} t^2)^2}} (x_B - m_{0y})(m_{0x} + 2K_{m_x} t) - e^{-\frac{(x_H - m_{0y} - m_{0x} K_{m_y} t - K_{m_x} K_{m_y} t^2)^2}{2(m_{0x} K_{\sigma_y} t + K_{m_x} K_{\sigma_y} t^2)^2}} (x_H - m_{0y})(m_{0x} + 2K_{m_x} t) \right]. \quad (7)$$

Теперь, с использованием (5) и (7), можно рассчитать вероятность  $p(T_0)$  безотказной работы системы на интервале  $[0, T_0]$ :

$$p(T_0) = 1 - \int_{T_0}^{\infty} f_{\xi}(t) dt \int_{T_0}^{\infty} f_{\eta}(t) dt. \quad (8)$$

Отсюда, искомая плотность распределения вероятности безотказной работы системы на интервале  $[0, T_0]$ , очевидно, равна

$$f(T_0) = f_{\xi}(T_0) \int_{T_0}^{\infty} f_{\eta}(t) dt + f_{\eta}(T_0) \int_{T_0}^{\infty} f_{\xi}(t) dt. \quad (9)$$

**Выводы.** Таким образом, для любого аналитически описанного деградационного процесса (нормального, релейского, экспоненциального) с использованием (3) для подсистем системы могут быть рассчитаны плотности распределения случайной продолжительности безотказной работы, а затем соответствующая вероятность для любого интервала  $[0, T_0]$ . Полученные соотношения позволяют для зависимых деградационных процессов оценить степень влияния одного из них на другой с целью выработки рекомендаций по повышению надежностных показателей системы, что определяет направление дальнейших исследований.

**Список литературы:** 1. Котенко Ю.Т., Раскин Л.Г. Прогнозирование технического состояния систем управления.– Х.: Основа, 1996.– 303 с. 2. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций.– М.: Наука, 1968.–463с. 3. Михайлов А.В. Эксплуатационные допуски и надежность радиоэлектронной аппаратуры.– М.: Сов. радио, 1986– 214с.

Поступила в редколлегию 30.03.07

*Л. Б. КАЩЕЕВ*, канд. техн. наук,  
*А. Б. КОВАНЕВ*, студент НТУ «ХПИ»

## **РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ ОЦЕНИВАНИЯ СЛОЖНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ИЗ СПРАЙТОВ**

В статті розглядається можливість оптимізації об'єму передачі даних по локальним мережам або Інтернету у виді зображень за рахунок кодування комбінацій окремих спрайтів. Пропонується застосування комбінаторної бази для створення комплексного критерію оцінювання компресії графічної інформації, а також нові практичні методи та формули.

В статье рассматривается возможность оптимизации объема передачи данных по локальным сетям или Интернету в виде изображений за счет кодирования комбинаций спрайтов. Предлагается использование комбинаторной базы для создания комплексного критерия оценивания компрессии графической информации, а также новые практические методы и формулы.

In the article the opportunity of optimization of the size of data transmission on local networks or the Internet due to coding combinations of sprites is considered. Use of combinatory base for creation of complex criterion of an estimation of a compression of the graphic information, and also new practical methods and formulas is proposed.

**Введение.** В современных информационно-аналитических центрах часто возникает необходимость дистанционно получать информацию о пространственной структуре материальных объектов, например, об их форме, деталях, принадлежности к классифицируемому виду, относительных размерах. В качестве исследуемых объектов могут выступать различного рода формируемые изображения: снимки с установленных фотокамер, визуальные образы или фотороботы людей, автомобилей, заснятые со спутника объекты природного или техногенного происхождения, космические явления и пр.

В идеальном варианте одним из основных критериев, предъявляемых к изображению, является его цифровое качество, определяемое попиксельной детализацией. Однако не всегда существует возможность или необходимость получать такое изображение, а достаточным условием для работы служат общие характеристики, по которым можно однозначно идентифицировать объект (например сравнив его с уже имеющимися в базе данных аналогами).

На рис.1 представлена диаграмма сжатия одного и того же графического изображения наиболее популярными форматами растровой и векторной графики.

Для обеспечения бесперебойного интерактивного режима даже в условиях высокоскоростных каналов связи предлагается экономить на трафике за счет разбиения изображения на спрайты.

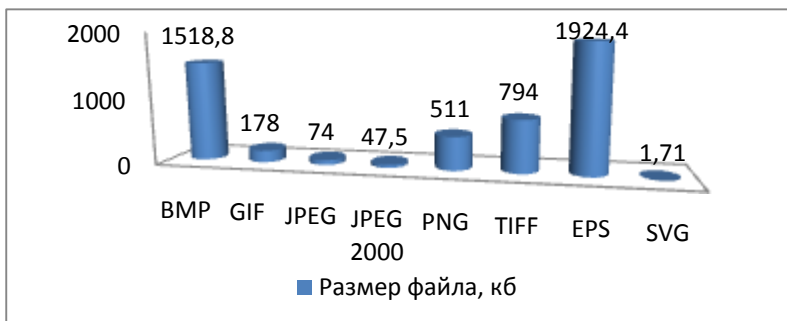


Рисунок 1 – Сжатие изображения различными графическими форматами

Наиболее простым методом для расчета объема передаваемой информации может служить выделение под каждый спрайт необходимого количество байт, идентифицирующих данный участок графического изображения.

Тогда объем закодированного по спрайтам изображения  $K$  в информативной части запроса можно посчитать по формуле:

$$K = \sum_{i=1}^n K_i . \quad (1)$$

Однако данный критерий нельзя назвать оптимальным.

Предположим, что для некоторого класса графических изображений на основе экспертных заключений считается оптимальным разделение на  $n$  спрайтов. Пусть  $k_i$  – количество различных двумерных образцов для  $i$ -го спрайта;  $c_i$  – количество разных цветов (или оттенков). Положим, что изначально отношения между спрайтами можно представить в виде полного  $N$ -дольного графа. Тогда  $K_{\max}$  – число всех подграфов  $N$ -дольного графа вычисляется по формуле:

$$K_{\max} = \prod_{i=1}^n c_i k_i . \quad (2)$$

Значение  $K_{\max}$  соответствует оценке сложности изображения. Рассчитаем число  $r$ , соответствующее количеству передаваемых байт в информационной части запроса:

$$r = \frac{\ln \prod_{i=1}^n c_i k_i}{8 \ln 2} . \quad (3)$$

Проанализируем, что изменится, если из  $N$ -дольного графа убрать одно ребро между вершинами  $\{j, j+1\}$ . Получим соотношение:

$$K_{\max} = \prod_{i=1}^n c_i k_i - \frac{\prod_{i=1}^n c_i k_i}{k_j \cdot k_{j+1}}. \quad (4)$$

Применив эту же операцию к другому ребру между теми же спрайтами, и в последствии повторив операцию над произвольными ребрами  $\{l, l+1\}$ -спрайтов при условии, что  $l \neq j$  и  $l \neq j+1$ , получим другое важное соотношение:

$$K_{\max} = \prod_{i=1}^n c_i k_i - m_j \frac{\prod_{i=1}^n c_i k_i}{k_j \cdot k_{j+1}} - m_l \frac{\prod_{i=1}^n c_i k_i}{k_l \cdot k_{l+1}} + m_j \cdot m_l \frac{\prod_{i=1}^n c_i k_i}{k_j \cdot k_{j+1} \cdot k_l \cdot k_{l+1}}, \quad (5)$$

где  $m_j, m_l$  соответствуют количеству убранных ребер на своем уровне.

Для трехмерного случая формула будет более громоздкой, однако, с точки зрения вычислений, если учесть, что алгоритмы нахождения полных подграфов с фиксированным числом вершин имеют экспоненциальную трудоемкость, такой вариант значительно экономичнее.

$$K_{\max} = \prod_{i=1}^n c_i k_i - m_j \frac{\prod_{i=1}^n c_i k_i}{k_j \cdot k_{j+1}} - m_l \frac{\prod_{i=1}^n c_i k_i}{k_l \cdot k_{l+1}} - m_t \frac{\prod_{i=1}^n c_i k_i}{k_t \cdot k_{t+1}} + m_j \cdot m_l \frac{\prod_{i=1}^n c_i k_i}{k_j \cdot k_{j+1} \cdot k_l \cdot k_{l+1}} +$$

$$+ m_j \cdot m_t \frac{\prod_{i=1}^n c_i k_i}{k_j \cdot k_{j+1} \cdot k_t \cdot k_{t+1}} + m_l \cdot m_t \frac{\prod_{i=1}^n c_i k_i}{k_l \cdot k_{l+1} \cdot k_t \cdot k_{t+1}} - m_j \cdot m_l \cdot m_t \frac{\prod_{i=1}^n c_i k_i}{k_j \cdot k_{j+1} \cdot k_l \cdot k_{l+1} \cdot k_t \cdot k_{t+1}}. \quad (6)$$

Обозначим последовательность  $M\{m_1 \dots m_t\}$  как количество убранных ребер между двумя спрайтами, последовательность  $p\{p_1 \dots p_t\}$  сопоставим с произведениями количеств образцов соседних спрайтов. Пусть  $\Omega$  – множество всех возможных подмножеств множества  $\{\frac{m_1}{p_1} \dots \frac{m_t}{p_t}\}$ ;  $\phi(\Omega)$  – мощность множества вычисляется по формуле:

$$\phi(\Omega) = 2^t - 1. \quad (7)$$

Пусть множество  $T\{T_0, T_1 \dots T_t\}$  будет соответствовать значениям, взятым из треугольника Паскаля, некоторая функция  $F(i, j, t)$  возвращает значение  $\frac{m(i, j, t)}{p(i, j, t)}$  такое, что будет сопоставлено элементу множества  $\Omega(i, j, t)$ .

Введем также обозначение  $P = \prod_{i=1}^n c_i k_i$ . Тогда, приводя к общему виду, получим формулу для расчета оценки  $K_{\max}$ :

$$K_{\max} = P \left( 1 - \sum_{i=1}^{T_1} \prod_{j=1}^1 F(i, j, 1) + \dots + (-1)^t \sum_{i=1}^{T_t} \prod_{j=1}^t F(i, j, t) \right). \quad (8)$$

Для целого ряда объектов, где возможно удалить между соседними блоками все несочетающиеся элементы, такое упрощение может привести к значительной минимизации значения  $K_{\max}$ , в то время как построить оценку удаления произвольных ребер в общем виде достаточно не просто.

Другим важным средством минимизации значения  $K_{\max}$  является оптимизация спрайтовой модели объекта. Пусть имеется некоторая часть изображения, разбитая на несколько однотипных по функциям спрайтов, например один элемент может состоять из  $r$  небольших участков, различающихся цветом (набор цветов при этом может быть одинаков или дополнен). В таком случае спрайты можно объединить, а количество однотипных образцов будет соответствовать числу перестановок из  $n$  объектов по  $r$ . Это число вычисляется по комбинаторной формуле:

$$K_i(n, r) = \frac{n!}{(n-r)!}. \quad (9)$$

В ходе комплексного решения, применимого к конкретным практическим задачам, предлагается использовать следующее алгоритмическое соотношение для вычисления факториала:

$$n! = \sum_{i=0}^n (-1)^{i+n} i^n \cdot C_n^i, \quad (10)$$

где  $C_n^i$  – сочетание из  $n$  объектов по  $i$  может быть рассчитано с помощью достаточно простого и не ресурсоемкого рекуррентного алгоритма нахождения чисел треугольника Паскаля:

$$\binom{n}{i} = \binom{n-1}{i} + \binom{n-1}{i-1}. \quad (11)$$

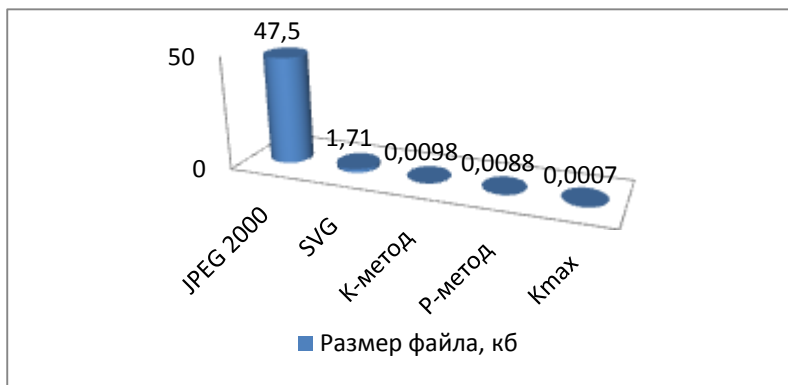


Рисунок 2 –Сжатие графического изображения с помощью растровых и векторных форматов и методами разбиения на спрайты

Формула (10) была получена на основе анализа степенных рядов, а именно путем последовательных вычитаний соседних элементов, а затем повторением данной операции  $n$  раз. Как выяснилось, в результате для ряда степени  $n$  разница на последнем итеративном шаге сводится к значению  $hn!$ , где  $h$  выполняет функцию расстояния между элементами изначальной последовательности. Данное отношение имеет ряд оптимизационных свойств, характерных для некоторых вычислительных операций или аналитических оценок.

В ходе проведенных экспериментов были получены результаты, показывающие актуальность разрабатываемой модели и алгоритмической базы. На рис. 2 приведена диаграмма, характеризующая уровень сжатия исходного графического изображения на примере растровых, векторных форматов, а также методами разбиения изображения на спрайты. В зависимости от предлагаемой модели и конкретного изображения характеристики уровня сжатия будут колебаться, однако общая тенденция сохранится. Таким образом, это позволяет экономить трафик и загрузку сети, а также хранить в сжатом виде целые наборы изображений.

**Список литературы:** 1. Андерсон Дж. А. Дискретная математика и комбинаторика. – Москва – Санкт-Петербург – Киев: издательский дом Вильямс, 2004.– 959 с. 2. Jim Gray, David T. Liu, Maria Nieto-Santisteban, Alex Szalay, David J. DeWitt, Gerd Heber. Scientific Data Management in the Coming Decade. – SIGMOD Record, Vol. 34, No. 4, Dec. 2005. 3. Божко А. Н., Толпаров А. Ч. Структурный синтез на элементах с ограниченной сочетаемостью. – Москва: Инженерное образование.– 2004.– №5.– <http://www.techno.edu.ru:16001/db/msg/13845.html>. 4. Weisstein Eric W. Pascal's Triangle. – Aug. 2005. – <http://mathworld.wolfram.com/PascalsTriangle.html>. 5. Weisstein Eric W. Factorial. – Dec. 2005. – <http://mathworld.wolfram.com/Factorial.html>.

Поступила в редколлегию 26.04.07



*А. А. КОБОЗЕВА*, канд. физ.-мат. наук, доц. ОНПУ,  
*Е. А. ТРИФОНОВА*, аспирант ОНПУ,

## **УЧЕТ СВОЙСТВ НОРМАЛЬНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ МАТРИЦЫ КОНТЕЙНЕРА ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ НАДЕЖНОСТИ ВОСПРИЯТИЯ СТЕГОСООБЩЕНИЯ**

У роботі розроблено новий підхід до проблеми забезпечення надійності сприйняття стегоповідомлення, основою якого є використання деяких особливостей спектрального розкладання матриці, а реалізація зводиться до аналізу збурення власних векторів і власних значень матриці контейнера при його стегоперетворенні. Приводяться результати обчислювального експерименту.

В работе разработан новый подход к проблеме обеспечения надежности восприятия стегосообщения, основой которого является использование некоторых особенностей спектрального разложения матрицы, а реализация сводится к анализу возмущений собственных векторов и собственных значений матрицы контейнера при его стегопреобразовании. Приводятся результаты вычислительного эксперимента.

In the article the new approach to a problem of maintenance in perception reliability of covert message is developed, which basis is use of some features of spectral matrix decomposition, and the realization is reduced to the indignation analysis of eigenvectors and eigenvalues of a matrix container at stegotransformations. The results of computing experiment are presented.

**Введение.** В связи с высокой информатизацией современного общества чрезвычайно актуальной на сегодняшний день является проблема защиты информации (ЗИ), решение которой невозможно без привлечения методов стеганографии.

Общей чертой стеганографических методов (СМ) является то, что секретные данные, или дополнительной информации (ДИ), встраиваются в некоторый не привлекающий внимания объект, называемый *контейнером* (или *основным сообщением* (ОС)), который затем открыто пересылается адресату по каналу связи или хранится в таком виде. Таким образом, скрытым остается сам факт существования ДИ при ее передаче, хранении и обработке [1,2]. Результатом встраивания ДИ в ОС, или *стегопреобразования* контейнера, является *стегосообщение*.

Основной задачей любого СМ является сохранение в секрете наличия тайного канала передачи информации, в связи с чем, СМ должен обеспечивать *надежность восприятия стегосообщения*, т.е. искажение ОС за счет погружения ДИ не должно быть заметно. Таким образом, в систему стеганографической передачи данных включается человек, что вносит дополнительные, непреодоленные до настоящего момента трудности в процесс математической формализации обеспечения рассматриваемого

требования, хотя работа в этом направлении ведется очень активно, с привлечением обширного математического аппарата [3,4,5].

Целью настоящей работы является разработка нового подхода к проблеме обеспечения надежности восприятия стегосообщения, основой которого является использование математических особенностей спектрального разложения (СР) матрицы, теоретическое обоснование которых проводится в статье, а также определение достаточных условий обеспечения высокой вероятности надежности восприятия стегосообщения на основе анализа возмущений спектра и собственных векторов матрицы контейнера при стегопреобразовании.

**1. Использование теории матриц в компьютерной стеганографии.** В качестве ОС рассматривается изображение в градациях серого, матрицу которого обозначим  $F$ .

Погружение ДИ в ОС, независимо от способа и области этого погружения, можно представить как возмущение  $\Delta F$  исходной матрицы  $F$ . Матрица стегосообщения  $\bar{F}$  очевидно удовлетворяет соотношению:  $\bar{F} = F + \Delta F$ , где  $\Delta F = f(F)$ , т.е.  $\Delta F$  является некоторой функцией  $F$ .

Любые преобразования, которые производятся над стегосообщением при его транспортировке или хранении, включая активные атакующие действия, будем рассматривать как дополнительные возмущения матрицы ОС  $F$ , представляя эти преобразования в виде элементарных матричных операций [6]

Определим набор параметров, которые однозначно и всесторонне характеризуют любое ОС и стегосообщение. Поскольку математической моделью изображения является матрица, а все преобразования над ОС и стегосообщением могут быть представлены в эквивалентном матричном виде, то в качестве искомого набора характеристик можно использовать, например, множество сингулярных чисел и соответствующих сингулярных векторов матрицы или спектр и множество собственных векторов (СВ) матрицы [7]. Если бы матрица  $F$  ОС была симметричной, то предпочтение следовало бы отдать второму набору параметров в силу следующих замечаний:

- построение СР симметричной матрицы обладает рядом преимуществ в вычислительном смысле по сравнению с построением сингулярного разложения для матрицы произвольной структуры той же размерности [7,8];
- собственные значения (СЗ) симметричной матрицы являются хорошо обусловленными [9], т.е.  $\max_{1 \leq j \leq n} |\lambda_j(F) - \lambda_j(F + \Delta F)| \leq \|\Delta F\|_2$ , где  $\lambda_j(\bullet)$  - СЗ соответствующей матрицы,  $\|\bullet\|_2$  - спектральная матричная норма (СМН) [7], чего нельзя утверждать в общем случае для несимметричных матриц.

Однако, как правило, матрица  $F$  ОС не удовлетворяет свойству:  $F = F^T$ . Чтобы «исправить» это, поставим в соответствие  $F$  две симметричные матрицы той же размерности по следующему правилу:

$$F = \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1n} \\ f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_{n1} & f_{n2} & \dots & f_{nn} \end{pmatrix} \rightarrow FV = \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1n} \\ f_{12} & f_{22} & \dots & f_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_{1n} & f_{2n} & \dots & f_{nn} \end{pmatrix}, FN = \begin{pmatrix} f_{11} & f_{21} & \dots & f_{n1} \\ f_{21} & f_{22} & \dots & f_{n2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_{n1} & f_{n2} & \dots & f_{nn} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Формула (1) дает принципиальную возможность рассматривать в качестве матрицы ОС симметричную матрицу, поведение которой описывается ее спектром и СВ, что и делается ниже. Аналогично, матрица произвольного возмущения, которому подвергается ОС, рассматривается как симметричная.

Формирование матрицы стегосообщения происходит с использованием верхнего треугольника преобразованной в ходе погружения ДИ  $FV$  и нижнего треугольника преобразованной матрицы  $FN$ , которые несут в себе непосредственно информацию об ОС.

**2. Достаточные условия обеспечения высокой вероятности надежности восприятия стегосообщения.** Пусть  $A$  – произвольная симметричная  $n \times n$  - матрица, элементы которой  $a_{ij} \in \mathbb{R}$ ,  $i, j = \overline{1, n}$ , с СЗ  $\lambda_i \in \mathbb{R}$ ,  $i = \overline{1, n}$ , и ортонормированными СВ  $u_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ , т.е.

$$A = U \Lambda U^T \quad (2)$$

- СР матрицы  $A$  [9] (здесь  $\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$ ,  $U = [u_1, \dots, u_n]$ ), в общем случае определяемое неоднозначно. СР (2) назовем *нормальным*, если элементы матрицы  $\Lambda$  удовлетворяют соотношению:  $|\lambda_1| \geq \dots \geq |\lambda_n|$ , а СВ  $u_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ , лексикографически *положительны*, т.е. первая ненулевая компонента каждого вектора положительна. Имеет место теорема.

**Теорема 1.** Пусть  $A$  – невырожденная симметричная  $n \times n$ -матрица, модули СЗ которой попарно различны. Тогда для нее существует *единственное* нормальное спектральное разложение (НСР).

**Доказательство.** Из условия теоремы следует, что размерность каждого собственного подпространства матрицы  $A$  равна единице [9]. Тогда для любого  $\lambda_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ , нормированный базис такого подпространства может определяться двумя способами: это вектора единичной длины противоположных направлений. Очевидно, только один из них является лексикографически положительным. Таким образом, столбец матрицы  $U$ , отвечающий СЗ  $\lambda_i$ , определится однозначно, кроме того, все столбцы  $U$

попарно ортогональны [9]. Порядок столбцов однозначно соответствует порядку элементов диагонали  $\Lambda$ . ■

Далее будем считать, что все рассматриваемые матрицы удовлетворяют условию теоремы.

В силу однозначности НСР имеет место

**Утверждение 1.** Любое преобразование, в частности стегопреобразование, матрицы ОС эквивалентным образом представимо в виде возмущения спектра и (или) собственных векторов матрицы ОС, определяемых НСР.

До настоящего времени при анализе уровня визуальных искажений, которые вносятся в контейнер при стегопреобразовании, широко применяются разностные показатели, основывающиеся на различных модификациях отношения «сигнал-шум» [2]:

$$SNR = \frac{\|F\|_F^2}{\|\Delta F\|_F^2}; PSNR = \frac{n^2 \max_{i,j} f_{ij}^2}{\|\Delta F\|_F^2}; IF = 1 - \frac{\|\Delta F\|_F^2}{\|F\|_F^2}, \text{ где } \|\bullet\|_F - \text{матричная норма}$$

Фробениуса [7], хотя слабые места таких показателей давно известны (например, отсутствие корреляции этих показателей со зрением человека). Это объясняется тем, что все существующие модели зрительного восприятия являются лишь частичным и ограниченным отражением зрительной системы человека в силу ее сложности, а показатели искажения, основанные на таких моделях, информация о которых доступна из открытой печати, все еще остаются несовершенными и достаточно сложными в реализации, как, например, предложенные в [3,5].

В упомянутых выше разностных показателях (и не только в них) используется матричная норма Фробениуса. Эта норма не обладает никакими преимуществами по сравнению с любой другой матричной нормой, в частности, СМН, использование которой в некоторых случаях является предпочтительным, о чем будет сказано ниже. Более того, имеет место

**Лемма 1.** Пусть  $F$  произвольная  $n \times n$ -матрица. Матричные нормы Фробениуса и СМН эквивалентны с константами эквивалентности 1 и  $n^{1/2}$ , т.е. имеет место неравенство:

$$\|F\|_2 \leq \|F\|_F \leq n^{1/2} \|F\|_2. \quad (3)$$

**Доказательство.** Известно [7], что векторная 2-норма ( $\|\bullet\|_2$ ) и матричная норма Фробениуса ( $L^2$ -норма), связаны соотношением:  $\|Fz\|_2 \leq \|F\|_F \|z\|_2$ , где  $z$  - вектор длины  $n$ . Поскольку СМН индуцирована [7] векторной 2-нормой, то  $\|F\|_2 = \max_{z \neq 0} \frac{\|Fz\|_2}{\|z\|_2} \leq \max_{z \neq 0} \frac{\|F\|_F \|z\|_2}{\|z\|_2} = \|F\|_F$ , что доказывает левую часть (3).

Пусть вектор  $z^{(1)} = (1, 0, \dots, 0)^T$ , тогда  $\frac{\|Fz^{(1)}\|_2^2}{\|z^{(1)}\|_2^2} = f_{11}^2 + \dots + f_{n1}^2 \leq \max_{z \neq 0} \frac{\|Fz\|_2^2}{\|z\|_2^2}$ .

Аналогично для любого вектора  $z$  вида  $z^{(k)} = (0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0)^T$  имеем:

$$\frac{\|Fz^{(k)}\|_2^2}{\|z^{(k)}\|_2^2} = f_{1k}^2 + f_{2k}^2 + \dots + f_{nk}^2 \leq \max_{z \neq 0} \frac{\|Fz\|_2^2}{\|z\|_2^2}, \quad k = \overline{1, n}. \quad (4)$$

Просуммировав неравенства (4) для всех  $k = \overline{1, n}$ , получим:

$$\sum_{i,j=1}^n f_{ij}^2 \leq n \max_{z \neq 0} \frac{\|Fz\|_2^2}{\|z\|_2^2}, \text{ откуда следует правая часть неравенства (3).} \blacksquare$$

Из леммы 1 непосредственно вытекает, что при малых  $n$  значения СМН и нормы Фробениуса сравнимы между собой. Мы вернемся к этому в п. 3.

Поскольку стегопреобразование ОС, а также возмущающие воздействия, которым подвергается стегосообщение, должны обеспечивать надежность его восприятия, то  $\|\Delta F\|$  не может быть бесконечно большой ( $\Delta F$  - матрица возмущения ОС или стегосообщения), т.к. в этом случае достоверным событием окажется нарушение выдвинутого требования. Кроме того, при  $\|\Delta F\| \rightarrow 0$ , вероятность обеспечения надежности восприятия будет стремиться к единице для каждого ОС [10]. Значения упомянутых выше разностных показателей для заданного изображения  $F$  определяются  $\|\Delta F\|_F$ : чем меньше  $\|\Delta F\|_F$ , тем лучше количественный показатель визуального искажения  $F$ , получаемый при использовании каждого из них. Принимая это во внимание, далее будем считать, что, чем меньше  $\|\Delta F\|_F$ , тем больше вероятность обеспечения надежности восприятия для изображения с матрицей  $F + \Delta F$  при заданном исходном изображении  $F$ , причем вместо  $\|\Delta F\|_F$  можно рассматривать  $\|\Delta F\|_2$ . Данная гипотеза подтверждается вычислительным экспериментом. Эксперимент проводился в среде MATLAB с использованием 100 разнообразных как по контрастности, так и по жанру (пейзажи, портреты, натюрморты и др.) изображений одинаковой размерности (300\*300 пикселей). Возмущение исходного изображения проводилось при помощи наложения шума (аддитивного гауссова, мультипликативного) с различными характеристиками. Результаты приведены на рис.1, где по оси Оу откладывался процент (от общего числа изображений) зашумленных изображений, для которых соблюдалась надежность восприятия, устанавливаемая при помощи субъективного ранжирования. Расчеты при

построении графиков проводились с использованием СМН и нормы Фробениуса.

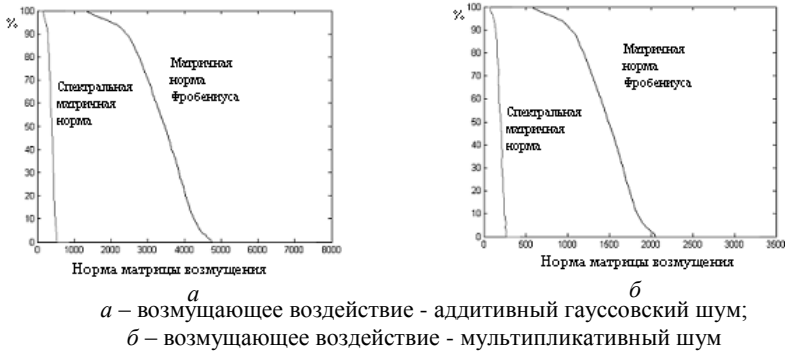


Рисунок 1 – Зависимость количества зашумленных изображений ( % ), сохранивших надежность восприятия, от нормы матрицы возмущающего воздействия.

Из сказанного выше следует, что для обеспечения достаточно высокой вероятности сохранения надежности восприятия стегосообщения при заданном контейнере СМ должен обеспечивать малую норму (в частности, Фробениуса, СМН) матрицы возмущения при стегопреобразовании.

В [11] было показано, что если погружение ДИ вызывает возмущения  $\delta_{k_1}, \dots, \delta_{k_p}$  СЗ  $\lambda_{k_1}, \dots, \lambda_{k_p}$  симметричной матрицы А ОС, то величина возмущения  $E$  матрицы контейнера А, вызванного таким стегопреобразованием, не зависит от того, какие именно СЗ были возмущены, а зависит лишь от абсолютной величины этих возмущений в соответствии с формулой:  $\|E\|_2 = \max_{1 \leq j \leq p} |\delta_{k_j}|$  (или  $\|E\|_F \leq p \max_{1 \leq j \leq p} |\delta_{k_j}|$ ).

**Теорема 2.** Пусть стегопреобразование вызвало возмущение СВ матрицы ОС. Достаточным условием для обеспечения малости нормы матрицы возмущения является соответствие возмущенных СВ малым по модулю СЗ матрицы ОС.

**Доказательство.** Пусть  $\Delta_{k_1}, \dots, \Delta_{k_p}$  - вектора возмущений СВ  $u_{k_1}, \dots, u_{k_p}$ , отвечающих СЗ  $\lambda_{k_1}, \dots, \lambda_{k_p}$ . Обозначим  $\bar{A}$  матрицу стегосообщения. Для  $\bar{A}$  имеет место выражение

$$\bar{A} = \sum_{i=1, i \neq k_1, \dots, k_p}^n \lambda_i u_i u_i^T + \sum_{j=1}^p \lambda_{k_j} (u_{k_j} + \Delta_{k_j})(u_{k_j} + \Delta_{k_j})^T = \sum_{i=1}^n \lambda_i u_i u_i^T + \sum_{j=1}^p \lambda_{k_j} (u_{k_j} \Delta_{k_j}^T + \Delta_{k_j} u_{k_j}^T + \Delta_{k_j} \Delta_{k_j}^T) = A + \sum_{j=1}^p \lambda_{k_j} (u_{k_j} \Delta_{k_j}^T + \Delta_{k_j} u_{k_j}^T + \Delta_{k_j} \Delta_{k_j}^T) \quad (5)$$

Из (5) получаем:

$$\begin{aligned} \|A - \bar{A}\|_2 &= \left\| \sum_{j=1}^p \lambda_{k_j} (u_{k_j} \Delta_{k_j}^T + \Delta_{k_j} u_{k_j}^T + \Delta_{k_j} \Delta_{k_j}^T) \right\|_2 \leq \\ &\leq \sum_{j=1}^p \left( \lambda_{k_j} (\|u_{k_j}\|_2 \|\Delta_{k_j}\|_2 + \|\Delta_{k_j}\|_2 \|u_{k_j}\|_2 + \|\Delta_{k_j}\|_2^2) \right) = \sum_{j=1}^p \left( \lambda_{k_j} (2\|\Delta_{k_j}\|_2 + \|\Delta_{k_j}\|_2^2) \right). \blacksquare \end{aligned}$$

Пусть  $E$  - возмущение матрицы  $A$  только за счет возмущения СВ, а  $u_i, \bar{u}_i$  - нормированные исходный и возмущенный СВ, отвечающие  $\lambda_i$ , а  $\theta_i$  - острый угол между ними. Назовем абсолютной отделенностью СЗ  $\lambda_i$  число:  $gap_{abs}(i, A) = \min_{i \neq j} |\lambda_j| - |\lambda_i|$ . Тогда, используя [12], несложно показать, что:

$$\sin \theta_i \leq \frac{2\|E\|_2}{gap_{abs}(i, A)}. \quad (6)$$

**Теорема 3.** Пусть стегопреобразование возмутило СВ вектора матрицы ОС. Достаточным условием для обеспечения малости нормы матрицы возмущения является соответствие возмущенных СВ собственным значениям матрицы ОС с малой абсолютной отделенностью.

**Доказательство.** Поскольку неравенство (6) имеет место для каждого СЗ матрицы  $A$ , то из него получаем:

$$\max_{1 \leq i \leq n} \left( \frac{1}{2} \sin \theta_i gap_{abs}(i, A) \right) \leq \|E\|_2. \quad (7)$$

Формула (7) означает, что если при возмущении исходной матрицы  $A$  ее СЗ не меняются, то даже сравнительно большие возмущения СВ, отвечающих плохо отделенным СЗ ( $gap_{abs}(i, A)$  мала), приведут к малому значению  $\|E\|_2$ . ■

**Вывод.** С целью обеспечения бóльшей вероятности надежности восприятия стегосообщения погружение ДИ в контейнер целесообразно производить таким образом, чтобы (при эквивалентном представлении этого погружения в виде возмущений спектра и СВ матрицы ОС) возмущенные СВ соответствовали малым по модулю СЗ или собственным значениям, имеющим малые абсолютные отделенности, а возмущения СЗ (причем не важно, каких именно) были малы. Чем меньше возмущения СЗ, абсолютные отделенности и модули СЗ, соответствующих возмущенным СВ, тем больше вероятность надежности восприятия стегосообщения.

**3. Разностный показатель визуального искажения, основанный на СМН.** Поскольку все теоретические выводы п.2 связаны со СР, хотелось бы и

оценку визуального искажения проводить, используя СМН, непосредственно получаемую из СР, а не норму Фробениуса, как в  $SNR$ ,  $PSNR$ ,  $IF$ , что требует дополнительных вычислений. В работе предлагается разностный показатель визуального искажения, в основе которого лежит СМН.

Приведем несколько вспомогательных рассуждений.

Разобьем матрицу ОС стандартным образом на блоки малой размерности [13], например,  $n = 8$ . Пусть  $F_{bl}$ ,  $\Delta F_{bl}$  - матрицы произвольного полученного при разбиении блока и его возмущения соответственно. Поскольку  $n$  мало, из леммы 1 получаем, что

$$\|\Delta F_{bl}\|_2 \approx \|\Delta F_{bl}\|_F. \quad (8)$$

Непосредственно из соотношения (8) вытекает истинность следующего утверждения.

**Утверждение 2.** Пусть оценка визуального искажения после предварительного стандартного разбиения ОС на блоки производится для каждого блока в отдельности. Если в качестве такой оценки использовалась  $\|\Delta F_{bl}\|_2$ , то она будет сравнима с оценкой, полученной с использованием  $L^2$ -нормы ( $L^2$ -norm). Кроме того, оценки, полученные при помощи  $SNR$ ,  $PSNR$ ,  $IF$  с использованием СМН и нормы Фробениуса, будут сравнимы (переход к другой матричной норме можно трактовать, как переход к другой шкале измерений в известных разностных показателях).

По аналогии с показателем  $IF$ , построим новый показатель:

$$SS = 1 - \frac{\|\Delta F\|_2}{\|F\|_2}, \text{ который назовем спектральным качеством изображения } SS.$$

**Утверждение 3.** При малых возмущающих воздействиях показатель  $SS$  является более чувствительным к этим возмущениям, чем  $IF$ , т.е. малые возмущения приведут к большим отклонениям значения  $SS$  от единицы, а значит, будут количественно заметнее, чем  $IF$ .

**Доказательство.** Если шум отсутствует, то  $IF = SS = 1$ . Будем считать, что возмущающее воздействие настолько мало, что имеет место соотношение:

$$\|\Delta F\|_F < \frac{\|F\|_F}{\sqrt{n}}, \quad (9)$$

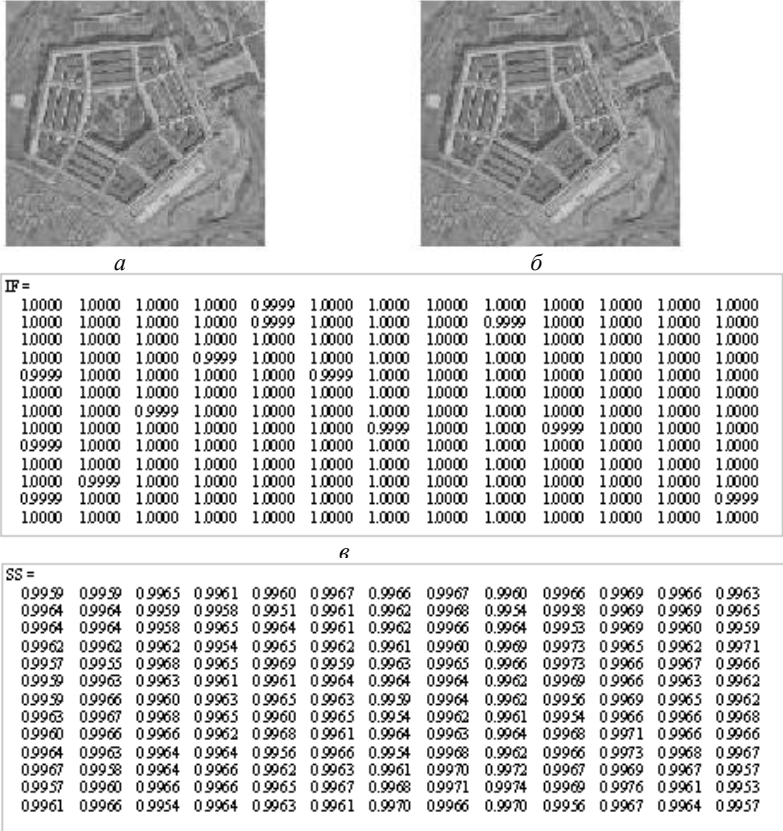
где  $n$  - размерность матрицы или блока контейнера.

Рассмотрим  $\|\Delta F\|_2 \|F\|_F^2$ . Для оценки этого произведения воспользуемся неравенством (3), тогда с учетом (9) получим:



$$\|\Delta F\|_2 \|F\|_F^2 \geq \frac{\|\Delta F\|_F}{\sqrt{n}} \|F\|_F^2 > \|\Delta F\|_F^2 \|F\|_F \geq \|\Delta F\|_F^2 \|F\|_2. \quad (10)$$

Из неравенства (10) непосредственно вытекает  $\frac{\|\Delta F\|_2}{\|F\|_2} > \frac{\|\Delta F\|_F^2}{\|F\|_F^2}$ , что эквивалентно тому, что показатель  $SS < IF \leq 1$  при малых возмущающих воздействиях, а значит, более чувствительный к ним. ■



а – исходное изображение, б – зашумленное изображение, в – матрица блоковых значений показателя IF; г – матрица блоковых значений показателя SS

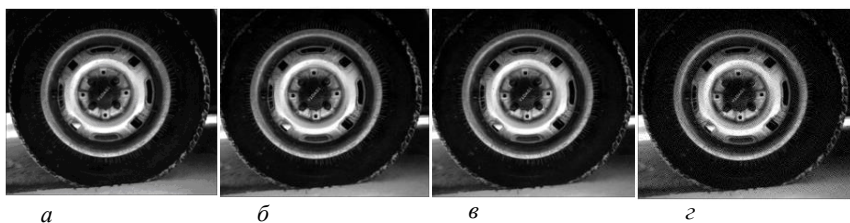
Рисунок 2 – Сравнение использования двух различных показателей IF и SS визуального искажения изображения.

Рис.2 является практическим подтверждением утверждения 3. На исходное изображение (рис.2, *а*) накладывался аддитивный гауссовский шум (математическое ожидание равно 0, а дисперсия 0.00001). Зашумленное изображение (рис.2, *б*) разбивалось на блоки. Показатели  $IF$  и  $SS$  рассчитывались для каждого блока (на рисунке они представлены в виде матриц с элементами, отвечающими блокам).

Показатель  $IF$ , в силу погрешностей округлений, вообще не сигнализирует о наличии шума (рис.2, *в*), чего нельзя сказать о показателе  $SS$  (рис.2, *г*).

**4. Результаты вычислительного эксперимента.** Основной целью вычислительного эксперимента было практическое подтверждение теоретических заключений, полученных в п.2. Эксперимент проводился в среде MATLAB с использованием более 100 монохромных изображений.

**4.1.** Изображение, используемое как ОС, разбивалось предвременно на блоки ( $n=8$ ). Каждому блоку по правилу (1) ставились в соответствие два симметричных блока, для которых строились НСР. Различные СЗ полученных спектров подвергались одинаковым возмущениям (величина возмущений менялась от опыта к опыту). Малые возмущения СЗ, независимо от того, какое именно СЗ возмущается, не дают визуальных искажений (рис.3). По мере роста возмущения эти искажения начинают проявляться. Так для приведенного на рис.3 изображения это происходит уже при аддитивном искажении СЗ, равном 30 (назовем такое значение пороговым). Для наглядной информативности приведен вариант, когда возмущение равно 100 (рис.3, *г*). Для различных изображений пороговое значение возмущения СЗ различны и устанавливается экспериментально, однако важно то, что при малых возмущениях, как было теоретически установлено в п.2, надежность восприятия стегосообщения сохраняется.



*а* – исходное изображение; *б* – наименьшее по модулю СЗ в каждом блоке увеличено на 10; *в* – наибольшее СЗ в каждом блоке увеличено на 10; *г* – наименьшее по модулю СЗ в каждом блоке увеличено на 100

Рисунок 3 – Изображение TIRE и его преобразования.

Заметим, что, как показывает проведенный вычислительный эксперимент и как вытекает из п.2, при наложении шума на изображение наибольшую

относительную погрешность имеют наименьшие по модулю СЗ, относительная погрешность монотонно уменьшается с увеличением модуля СЗ (рис.4). Рисунок 4 соответствует наложению на испытуемые изображения аддитивного гауссова шума с нулевым математическим ожиданием и различными значениями дисперсии. Для наглядности по оси  $Ox$  откладывался номер испытания (при его увеличении дисперсия уменьшается), по оси  $Oy$  - номер СЗ при НСР (1 - максимальное, ..., 300 – минимальное по модулю СЗ), яркость соответствующей клеточки на графике определялась как значение выражения:  $\frac{|Исх. СЗ_i - Зап. СЗ_i|}{|Исх. СЗ_i|} * 100\%$ ,

усредненное для всех рассматриваемых изображений. Из полученных результатов следует *вывод*: при использовании стеганографическим методом для погружения непосредственных возмущений СЗ, как это предлагается, например, в [11], для обеспечения достаточной эффективности декодирования целесообразно использовать минимальные по модулю СЗ, т.к. они более всего «пострадают» даже при малых возмущающих воздействиях на стегосообщения.

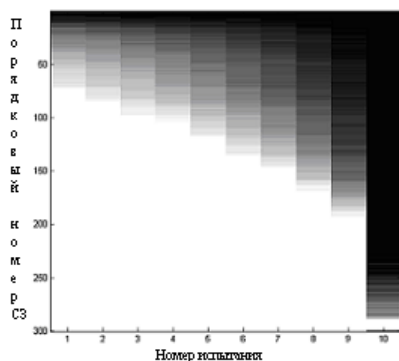


Рисунок 4 – Относительная погрешность СЗ в зависимости от величины модуля СЗ и характеристики накладываемого шума

**4.2.** Второй этап вычислительного эксперимента заключался в следующем. После разбиения исходного изображения на блоки и вычисления НСР для симметричных матриц, отвечающих каждому блоку в соответствии с формулой (1), возмущения проводились для каждого блока в пределах матриц СВ (подробно в [12]). При проведении предварительного вычислительного эксперимента было установлено, что, как правило, малые по модулю СЗ имеют и малые абсолютные отдаленности, поэтому, учитывая результаты п.2, возмущению подвергались  $u_8, u_7, \dots, u_4$  и, возможно,  $u_3$ , полученные из НСР,



обеспечивать визуальную устойчивость, что подтверждается и на практике в ходе широкого применения LSB.

**Заключение.** В работе предлагается новый подход к проблеме обеспечения надежности восприятия стегосообщения, основанный на анализе возмущений спектра и СВ матрицы ОС при стегопреобразовании. Достоинством такого подхода является то, что он открывает возможности обеспечения высокой вероятности надежности восприятия стегосообщения для любого вновь создаваемого СМ. Для этого достаточно потребовать, чтобы алгоритм погружения СМ быть таким, чтобы при эквивалентном представлении стегопреобразования в виде возмущений спектра и СВ матрицы ОС, эти возмущения каснулись лишь СВ, отвечающих СЗ, малым по модулю, с малыми абсолютными отделенностями, и возмущения СЗ были малы. Кроме того, для уже существующих СМ такой анализ легко объясняет причину нарушения или устойчивое обеспечение надежности восприятия стегосообщения.

Вычислительная сложность практической реализации предложенного подхода сравнима с количеством арифметических операций для построения СР матрицы размерности  $n \times n$  и составляет  $O(n^3)$ , а при предварительном разбиении ОС на блоки -  $O(n^2)$  операций.

**Список литературы:** 1. *Хорошко В.А., Чекатков А.А.* Методы и средства защиты информации.– К.: Юниор, 2003. - 501 с. 2. *Конахович Г.Ф., Пузыренко А.Ю.* Компьютерная стеганография. Теория и практика.– К.: МК – Пресс, 2006.- 288 с. 3. *S. Winkler.* A perceptual distortion metric for digital color images. In: Proc.ICIP, vol.3,pp.399-403,Chicago,IL,October 1998. 4. *S.J.P. Westen, R.L. Lagendijk, J. Biemond.* Perceptual Image Quality Based on a Multiple Channel HVS Model. In: Proceeding of ICASP, vol.4, pp.2351-2354,1995. 5. *Yung-Kai Lai, C.-C. Jay Kuo, Jin Li.* New image compression artifact measure using wavelets. SPIE's Symposium on Visual Communications and Image Processing, San Jose, CA, February 8-14, 1997. 6. *Ф.Р. Гантмахер.* Теория матриц. - М.: Наука, 1988. 7. *Деммель Дж.* Вычислительная линейная алгебра.– М.: Мир, 2001. - 430 с. 8. *Каханер Д., Моулер К., Нэй С.* Численные методы и программное обеспечение. – М.: Мир, 2001. – 575 с. 9. *Парлетт Б.* Симметричная проблема собственных значений. Численные методы.- М.: Мир, 1983. -384 с. 10. *Маслов В.П.* Асимптотические методы и теория возмущений. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988.-312 с. 11. *Кобозева А.А.* Стеганографический метод, основанный на преобразовании спектра симметричной матрицы. – Праці УНДІРТ, 2006, №4(48), - с.44-52. 12. *Кобозева А.А.* Применение сингулярного и спектрального разложения матриц в стеганографических алгоритмах. Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля, 2006, №9(103),ч.1,-с.74-83. 13. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений.- М.: Техносфера, 2005.- 1072 с.

*Поступила в редколлегию 20.03.07*

**Г. С. КИРИЧЕНКО**, Харківський національний ун-т внутрішніх справ,  
**О. В. СТРУКОВА**, Харківський національний ун-т внутрішніх справ

## СТАТИСТИЧНИЙ МЕТОД СТЕГАНОАНАЛІЗУ

В статті розглянуто один із методів стеганоаналізу малюнків, який використовує статистичні критерії. Докладно роз'яснена методика виявлення прихованих вкладень. Подаються практичні результати, одержані з використанням цього методу.

В статье рассмотрен один из методов стеганоанализа рисунков, который использует статистические критерии. Обстоятельно разъяснена методика выявления скрытых вложений. Подаются практические результаты, полученные с использованием этого метода.

One of methods of steganalysis pictures is considered in the article, which uses statistical criteria. It is detailed the explained method of exposure of the hidden inserts. The practical results got with the use of this method are given.

Стеганографія є способом приховування передачі інформації, розміщуючи її в графічних файлах, відео- та аудіо-файлах тощо. Такою інформацією може бути не злочинна (конфіденційна чи секретна) і в цьому випадку стеганографія використовується як спосіб захисту інформації. Разом із тим стеганографія дозволяє приховувати передачу інформації злочинного характеру, що по суті є порушенням інформаційної безпеки [1].

Засобом виявлення прихованих даних методами стеганографії є стеганоаналіз.

На сьогодні існує декілька методів стеганоаналізу. Один із них полягає в такому .

Більшість методів вбудовування даних у графічні файли якимсь чином змінюють найменш значущі біти LSB (Least Significant Bit). Ідея статистичного стеганоаналізу полягає у порівнянні теоретичного розподілу найменш значущих біт малюнку, в який вбудовані приховані дані, з фактичним розподілом найменш значущих біт у цьому малюнку. При цьому міра схожості теоретичного та фактичного розподілу є мірою вірогідності вбудовування прихованої інформації [2]. Міру схожості можна визначити за допомогою відповідних статистичних критеріїв.

В ідеальному випадку для порівняння теоретичного і фактичного розподілу бітів потрібний оригінал зображення, тобто малюнок без вбудованих даних. Але в більшості випадків оригіналу немає. Тому однією із задач стеганоаналізу є одержання теоретичного розподілу, характерного для стеганограм, тобто розподілу частот, який одержується після вбудовування даних.

Одним із статистичних критеріїв згоди є критерій  $\chi^2$  (Пірсона). За допомогою цього критерію встановлюється із заданим рівнем значимості однорідність теоретичного та емпіричного розподілів [3]. За наявними теоретичними і фактичними частотами знаходиться розрахункове значення критерію Пірсона:

$$\chi_{\text{пірсона}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^S (N_i - N'_i)^2}{N'_i},$$

де  $N'_i$  – теоретичні частоти,  $N_i$  – емпіричні частоти.

Доведено, що при  $S \rightarrow \infty$  закон розподілу будь-якої випадкової величини незалежно від того, якому закону розподілу підлягала генеральна сукупність, спрямований до закону розподілу  $\chi^2$  з  $k = S - 1$  ступенями свободи.

Із спеціальних таблиць в залежності від кількості ступенів свободи  $k$  та рівня значимості  $\alpha$  знаходиться критичне значення критерію Пірсона  $\chi_{\text{еддд}}^2(\alpha; k)$ . Якщо  $\chi_{\text{пірсона}}^2 < \chi_{\text{еддд}}^2$  - немає підстав відкинути нульову гіпотезу, тобто теоретичний та емпіричний закони розподілу однорідні. У випадку, коли  $\chi_{\text{спост}}^2 < \chi_{\text{крит}}^2$ , нульову гіпотезу відкидають (теоретичний та емпіричний закони розподілу не однорідні).

Тепер зупинимося на оцінці теоретичних частот закону розподілу. Звернемося до прикладу. Нехай є малюнок 24-розрядного формату BMP (рис. 1).



Рис.1. Червона компонента повнокольорового зображення та її найменш значущі біти

Для певного класу BMP-зображень найменш значущі біти не є шумовими. Якщо подивитись на малюнок, поданий на рис. 1, можна чітко бачити залежність між LSB та інтенсивністю кольору зображення пікселя. На малюнку наближену до мінімуму інтенсивність червоної кольорової компоненти має церква (майже чорна). Майже всі найменш значущі біти цієї

частини малюнку мають значення 0. Найяскравіше місце на малюнку – відбитки сонячних променів від поверхні річки. Тут значення кольорової компоненти наближається до максимального (майже всі найменш значущі біти цієї частини мають значення 1).

Коли ж в LSBs приховується інформація, наприклад, кодований текст, розподіл LSB буде наближатися до випадкового.

Нехай інформація приховується у частині зображення, яка має однаковий колір. Наприклад, майже весь чорний. Перед вбудовуванням повідомлення майже всі пікселі зображення будуть мати значення 0. Тому LSBs будуть мати нульові значення. Після вбудовування випадкового повідомлення, розподіл LSBs буде прямувати до співвідношення 50/50.

Розглянемо декілька бітів (значення) зображення. Для значень довжиною 2 біти можна сформувати дві пари, які відрізняються лише останнім бітом. Якщо останній біт у парі значень містить вбудовану інформацію, їх кількість для малюнка приблизно однакова. Пари значень довжиною 2 біти показані в табл. 1.

Таблиця 1

00 01	Перша пара значень.
10 11	Друга пара значень.

Для значень довжиною три біти можна сформувати 4 пари які відрізняються лише одним бітом. Ці пари значень показані в табл. 2.

Таблиця 2

000 001	Перша пара значень.
010 011	Друга пара значень.
100 101	Третя пара значень.
110 111	Четверта пара значень.

Аналогічно формуються пари значень довжиною у 8 біт (табл. 3).



Таблиця 3

0000 0000 0000 0001	Перша пара значень.
0000 0010 0000 0011	Друга пара значень.
...	...
1111 1100 1111 1101	127 пара значень.
1111 1110 1111 1111	128 пара значень.

Отже для кольорової компоненти, яка приймає 256 значень, формується 128 пар. Далі підраховуються частоти, з якими зустрічаються значення в парах і знаходиться середнє арифметичне для кожної пари значень. Одержані величини і є теоретичними частотами пар значень при наявності вбудованих даних.

Розглянемо працездатність цього методу стеганоаналізу на деяких стандартних стеганографічних програмах вбудовування даних.

Використовуючи програму *EzStego*, вбудовуємо в малюнок, поданий на рис. 1, текстову інформацію, яка займає 45% від максимально можливої.

Діаграма на рис.2, одержана з використанням описаної методики вказує місцеположення вбудованої інформації у файлі зображення. Це підтверджується зображенням малюнок ліворуч на рис.2, де показано розподіл LSB зображення.

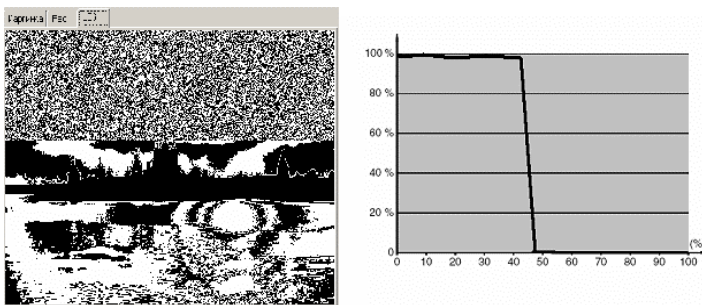


Рис.2 Найменш значущі біти малюнка із вбудованою інформацією та аналіз факту вірогідності вбудовування інформації

Варто зазначити, що описана методика не є універсальною. Вона спрацьовує лише для послідовного вкладення прихованої інформації, тобто вкладення у кожний послідовний байт зображення. Якщо використати, наприклад, програму *S-Tools*, яка розподіляє вбудовані біти по всьому зображенню, а кількості інформації недостатньо для заповнення всіх байт зображення, то виявлення прихованих вкладень не відбувається.

**Список літератури:** 1. Генне О.В. Стеганография: основные положения стеганографии //Конфидент № 3 (33) май - июнь 2000 г. 2. Westfeld A. and Pfitzmann A. Attack on Steganographic Systems, Lectures Notes in Computer Science, vol. 1768, Springer-Verlag, Berlin, 2000, pp. 61-75 3. Гурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебное пособие для ВУЗов. М.: Высш. шк., 2003. – 479 с.:

*Надійшла до редколегії 05.04.07*

УДК 519.146

**В. П. ПУТЯТИН**, д-р. техн. наук, зав. каф. кибернетики ХНТУСХ  
им. П. Василенко, **А. Б. ЭЛЬКИН**, соискатель ХНТУСХ им. П.Василенко

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ РАЗБИЕНИЙ В АПК**

Розглянуто математичну модель задачі оптимізації розбиття двовимірної області складної форми на підобласті рівної площі. Такі задачі виникають, наприклад, при передачі земельних наділів з колективної у особисту власність членів сільгоспідприємств. Досліджуються специфічні особливості математичної моделі, які у подальшому лягли в основу чисельної реалізації математичної моделі.

Рассмотрена математическая модель задачи оптимизации разбиения двумерной области сложной формы на подобласти равной площади. Такие задачи возникают, например, при передаче земельных наделов из коллективной в частную собственность членов сельхозпредприятий. Исследуются особенности математической модели, которые в дальнейшем легли в основу численной реализации математической модели.

The mathematical model of problem of optimization of fragmentation a two-dimensional region of the complex form on subregions of equal area is considered. Such problems appear, for instance, at the disposition allotment from collective property in the private property of members of agricultural enterprise. The particularities of mathematical models, which underlie of numerical implementation of the mathematical models, are researched.

**Введение.** Реформирование аграрного сектора Украины требует разработки соответствующих методов и средств, базирующихся на техническом, технологическом, юридическом, экономическом и нормативном обеспечении. При этом, одной из проблем реформирования является процесс паевания земли, суть которого заключается в передаче земельных участков

(паев) из коллективной в частную собственность членов сельхозпредприятий. Законодательство Украины [1 – 2] и другие регламентирующие документы определяют круг задач, возникающих в процессе паевания земли, для реализации которых необходима разработка конструктивных механизмов, включающих математические модели, численные методы, программное и специальное аппаратное обеспечение.

**Постановка проблемы.** Процесс выделения паев земли [1-3] требует решения, на первый взгляд, простой прикладной задачи: *необходимо разбить область сложной пространственной формы (земельное угодие, поле) на подобласти (паи), имеющие одинаковые площади или площади, кратные числу объединившихся пайщиков.* При этом решение этой общей проблемы усложняется еще и тем, что необходимо предусмотреть сеть связующих дорог минимальной общей длины, проходящих по границам между паями, для обеспечения доступа к каждому участку (паю) [2, 4]. Кроме того, необходимо принимать во внимание так называемые области запрета, представляющие собой, например, деградированные или малопродуктивные сельскохозяйственные угодья, водоемы, строения, участки земли не сельскохозяйственного назначения, опоры линий электропередач, автомагистрали, железнодорожные пути и т.д. [2].

**Анализ исследований и публикаций.** Рассматриваемый класс задач относится к геометрическому проектированию [5, 11], включающему следующие задачи: размещения геометрических объектов различной физической природы; разбиения сложных областей на подобласти; раскрытия материала; многомерной компоновки; покрытия; трассировки; прокладки коммуникационных соединений и др. Характерной чертой рассматриваемых в настоящей работе задач разбиения, является то, что при их решении необходимо учитывать характер области разбиения, а именно ее «анизотропию», проявляющуюся в неравномерности общего рельефа поля, подлежащего разбиению на пай. Учет последнего фактора требует применения наземных и спутниковых технологий, обеспечивающих топоориентирование [6 – 9] и технологию точного земледелия [7]. В работах [6, 8] рассмотрены вопросы определения рационального направления прямолинейного движения сельскохозяйственного агрегата, при челночном способе его передвижения, с учетом конфигурации поля и его рельефа. Оптимизация направления движения агрегата осуществляется путем минимизации общей длины холостого хода агрегата на поворотах, что обеспечивает максимальную часовую производительность исследуемого агрегата. Эти результаты получены для различных ширин захвата агрегата (от 4,0 м. до 12,0 м.) и для угла наклона поля  $\alpha = [0^\circ, 5^\circ]$ . Для  $\alpha > 5^\circ$ , поле обрабатывается поперек склона, чтобы предотвратить возникновение водной эрозии почвы.

**Постановка задачи и формулировка цели исследования.** Пусть на плоскости  $P(xOy)$  задана исходная область  $\Omega$  сложной формы (земельное

поле, подлежащее паеванию). Область  $\Omega$  описывается неравенством  $f(x, y) \leq 0$ . Пусть также определены области запрета  $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_m$  сложной формы, например, строения, водоемы, автомагистрали и т.п.. Каждая из этих областей принадлежит исходной области  $\Omega$ , т.е. выполняется равенство  $\bigcup_{j=1}^m \Omega_j \cap \Omega = \bigcup_{j=1}^m \Omega_j$ , и описывается соответственно неравенствами  $f_1(x, y) \leq 0, f_2(x, y) \leq 0, \dots, f_m(x, y) \leq 0$ . Эти неравенства и неравенство  $f(x, y) \leq 0$  могут быть представлены или с помощью  $R$  – функций Рвачева В.Л. [10], или в виде оцифрованного графического изображения поля, полученного с помощью геоинформационной системы.

Под полезной областью  $\Omega^*$  будем понимать область, образованную в результате вычитания из исходной области объединения всех областей запрета:  $\Omega^* = \Omega \setminus \bigcup_{j=1}^m \Omega_j$ .

Задача выделения паев земли, например, для «узкой и вытянутой» области  $\Omega$  состоит в следующем. Необходимо разбить полезную область  $\Omega^*$  на как можно большее количество областей-полос (паев)  $T_1, T_2, \dots, T_n$  так, чтобы коэффициент заполнения  $\chi$  полезной области  $\Omega^*$  полосами  $T_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) был максимален.

**Функция цели** рассматриваемой задачи

$$\chi \rightarrow \max, \quad (1)$$

где  $\chi = \frac{S(\bigcup_{i=1}^n T_i)}{S(\Omega^*)}$ ;  $0 \leq \chi \leq 1$ ;  $S$  площадь соответствующей области.

Функция цели  $\chi$  может быть также определена как разность площади полезной области  $\Omega^*$  и площади области, образованной в результате объединения всех полос  $T_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ):

$$\chi = S(\Omega^*) - S(\bigcup_{i=1}^n T_i) \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $0 \leq \chi \leq S(\Omega^*)$ .

При этом в процессе разбиения полезной области  $\Omega^*$  на области-полосы  $T_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) накладываются следующие ограничения.

**Ограничение 1.** Все паи должны быть размещены в рамках исходного земельного поля, исключая области запрета, т.е. в рамках полезной области  $\Omega^*$ . В этом случае области-полосы  $T_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) полностью размещаются в полезной области  $\Omega^*$ :

$$\bigcup_{i=1}^n T_i \cap \Omega^* = \bigcup_{i=1}^n T_i. \quad (3)$$

Условия (3) эквивалентны неравенствам [11]:

$$\rho_i(T_i, R^2 \setminus \Omega^*) > 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (4)$$

где  $\rho_i$  – соответствующее расстояние между областью-полосой  $T_i$  и дополнением полезной области  $\Omega^*$  в  $R^2$ ;  $R^2$  – неподвижная плоскость  $P(xOy)$ .

**Ограничение 2.** Невозможность наложения соседних паев друг на друга. В этом случае соседние области-полосы  $T_i$  и  $T_{i+1}$  ( $i = 1, 2, \dots, n-1$ ) не должны пересекаться:

$$T_i/t_i \cap T_{i+1}/t_{i+1} = \emptyset, \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (5)$$

где  $t_i, t_{i+1}$  – соответствующие границы областей-полос  $T_i$  и  $T_{i+1}$ .

Условия (5) эквивалентны неравенствам [11]:

$$\rho_{i,i+1}(T_i, T_{i+1}) \geq 0, \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (6)$$

где  $\rho_{i,i+1}$  – соответствующее расстояние между соседними областями-полосами  $T_i$  и  $T_{i+1}$ .

Неравенства (6) могут быть модифицированы, если требуется, чтобы соседние области-полосы  $T_i, T_{i+1}$  были расположены на расстоянии, не меньшем заданного значения  $D_i$ , учитывающего, например, дороги [4]:

$$\rho_{i,i+1}(T_i, T_{i+1}) \geq D_i = const \geq 0, \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (7)$$

**Ограничение 3.** Необходимо, чтобы все паи имели одинаковую площадь, значение которой известно в начале процесса паевания поля, т.е. области-полосы  $T_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) равновелики по площади:

$$S(T_1) = S(T_2) = \dots = S(T_n) = S^* = const \geq 0. \quad (8)$$

**Ограничение 4.** Определяет форму каждого пая земли в виде полосы, ограниченной двумя параллельными линиями и сложной границей полезной области, и учитывает угол ориентации паев. При этом каждая область-полоса  $T_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) образуется исходя из следующего принципа:

$$T_i = \{M(x, y) \in \Omega^* \mid C_i^n \leq \alpha x + \beta y \leq C_i^n\}, \quad (9)$$

где  $M(x, y)$  – точка плоскости  $P(xOy)$ , принадлежащая полезной области  $\Omega^*$ ;  $l_i^n : \alpha x + \beta y = C_i^n$ ,  $l_i^n : \alpha x + \beta y = C_i^n$  – две параллельные прямые линии, («левая» и «правая»), отсекающие в полезной области  $\Omega^*$  область-полосу  $T_i$ .

При этом:

$$\forall i, i = 1, 2, \dots, n : C_i^n > C_i^n, \quad (10)$$

$$\forall i, j (i, j = 1, 2, \dots, n, i \neq j) : l_i^n \parallel l_i^n \parallel l_{i+1}^n \parallel l_{i+1}^n. \quad (11)$$

Таким образом,  $l_1^1, l_1^n, l_2^1, l_2^n, \dots, l_n^1, l_n^n$  образуют пучок параллельных прямых линий  $L$ , угол наклона  $\theta$  к абсциссе  $Ox$  которого определяет отношение коэффициентов  $\alpha$  к  $\beta$ :  $tg\theta = -\frac{\alpha}{\beta}$ .

Угол наклона  $\theta$  или задается экспертом, или определяется [6, 8] с учетом рельефа области  $\Omega$ . При этом  $\theta = const, 0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ .

**Ограничение 5.** Задаёт минимальную ширину каждой полосы, необходимую для создания условий, являющихся обязательными, например, для обработки паев специализированной техникой [6, 8]. При этом ширина  $d(T_i)$  области-полосы  $T_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) определяется как расстояние между соответствующими параллельными прямыми линиями  $l_i^1$  и  $l_i^n$ , образующими область-полосу  $T_i$ . Ширина  $d(T_i)$  должна быть не меньше заданного значения константы  $D_2$ :

$$d(T_i) = \rho(l_i^1, l_i^n) \geq D_2 = const \geq 0, (i = 1, 2, \dots, n). \quad (12)$$

Таким образом, математическая модель задачи разбиения «узкой и вытянутой» области сложной пространственной формы на подобласти равной площади сводится к поиску экстремума функции цели (1) или (2) с ограничениями (4, 7 – 12). Проведем анализ наиболее специфических особенностей рассматриваемой математической модели (1, 4, 7 – 12).

**Особенности математической модели и ее численной реализации.** Для существования решения задачи разбиения, необходимы выполнения следующих условий:

$$S(\Omega^*) \geq S^*, \quad (13)$$

то есть, площадь  $S$  полезной области  $\Omega^*$ , подлежащей разбиению, должна быть больше или равна заданной площади  $S^*$  полосы разбиения, и выполнение (хотя бы для одной полосы) технологического ограничения (12).

Число  $n$  полос в основном зависит от соотношения площадей  $S(\Omega^*)$  и  $S^*$  в (13), а также выбранной ориентации  $\theta$  полос [6, 8], пространственной формы области  $\Omega^*$ , величин характерных размеров области  $\Omega^*$ , допустимого значения ширины полос.

Оценка числа полос осуществляется следующим образом:

$$0 \leq n \leq n_{\max} = E \left( \frac{S(\Omega^*)}{S^*} \right), \quad (14)$$

где  $n_{max}$  – максимально возможное число полос, на которое можно разбить полезную область;  $S^*$  – заданная площадь каждой полосы разбиения;  $E$  – целая часть числа.

В общем случае, для сложной пространственной формы области  $\Omega$ , система ограничений (4, 7 – 12) содержит нелинейные неравенства и является нелинейной.

Оптимизация функции цели (1) или (2) требует минимизации незанятой части области  $\Omega^*$  или, другими словами, максимизации числа  $n$  полос разбиения. Это требование выводит нашу модель из класса моделей в виде системы ограничений в класс моделей нелинейного математического программирования. Число локальных экстремумов в основном зависит от пространственной формы области  $\Omega^*$ . Значения функции цели  $\chi=1$  для (1) и  $\chi=0$  для (2) достигаются при отсутствии незанятой части области  $\Omega^*$ , то есть при точном разбиении.

Специфика постановки исходной задачи такова, что для ее решения существует возможность воспользоваться идеей последовательно-одиночного размещения геометрических объектов [11]. Это дает возможность осуществить редукцию размерности основной задачи и перейти к последовательно-одиночному разбиению области  $\Omega^*$  областями-полосами.

При этом на верхнем уровне возможна организация одной из следующих итерационных процедур: последовательно-одиночное разбиение области  $\Omega^*$  на области-полосы «справа - налево»; то же «слева - направо»; случайным образом назначаются координаты полюса первой полосы, а затем от этой полосы организуется поисковый процесс «справа - налево» и «слева - направо».

На нижнем уровне осуществляется поиск ширины полосы. Если область задана в аналитическом виде, то площадь полосы находится точным вычислением определенного интеграла с одним нефиксированным пределом интегрирования, с помощью которого затем устанавливается ширина полосы. В результате приравнивания значения интеграла к заданной площади полосы, приходим к алгебраическому уравнению с одним неизвестным, а именно – с не фиксированным пределом интегрирования. Находя действительный и принадлежащий заданному отрезку корень этого уравнения, получаем возможность определения значения ширины полосы.

Аналогично, если разбиваемая область задана с помощью геоинформационной системы в оцифрованном виде, то возможно применение одного из многочисленных методов численного интегрирования с одним не фиксированным искомым параметром – пределом интегрирования.

### **Выводы и рекомендации.**

Предложена математическая модель задачи разбиения области сложной пространственной формы на подобласти равной площади.

Исследованы особенности математической модели: проанализированы возможные функции цели и система ограничений; получены условия разрешимости задачи (совместности системы ограничений); дана оценка размерности пространства искомых параметров; оценивается число возможных ограничений; обосновывается принадлежность задач такого класса к задачам математического программирования.

Предложены возможные подходы к численной реализации математической модели. Отмечается, что специфика постановки исходной задачи такова, что для ее решения существует возможность воспользоваться идеей последовательно-одиночного размещения геометрических объектов. Это дает возможность осуществить редукцию размерности основной задачи и перейти к последовательно-одиночному разбиению области.

В дальнейшем необходимо проведение согласования точности численной реализации с точностью измерительных средств (спутниковых, геоинформационных, лазерных, топографических, механических) для определения линейных размеров на местности.

Если условия корректной постановки задачи не выполняются (узкие, протяженные, нетехнологичные подобласти), то необходима разработка новых математических моделей, например, задач разбиения области сложной пространственной формы – на простые по форме геометрические объекты заданной площади.

Методы их решения, по – видимому, близки по идее к нерегулярным сеточным методам (покрытие неравномерной сеткой области сложной формы), с последующей оптимизацией распределения узлов сетки и автоматизацией выбора ее шага. Кроме того, область, образованную незанятыми граничными ячейками, возможно, например, разбить на прямоугольники равной площади, путем их размещения в этой области.

Рекомендуется применение рассмотренной математической модели для решения задач разбиения в АПК (паевание земли), в легкой промышленности (рациональное использование материала), в приборостроении (рациональная резка искусственных монокристаллов) и др.

**Список литературы:** 1. *Про землеустрій:* Закон України від 22 травня 2003 року // Відомості Верховної Ради. – 2003. – № 36. – с. 282. 2. *Про порядок виділення в натурі (на місцевості) земельних ділянок власникам земельних часток (паїв):* Закон України від 5 червня 2003 року // Відомості Верховної Ради. – 2003. – № 38. – с. 314. 3. *Иванников А.* Арендная плата не устраивает крестьян // Журнал ТПП Украины «Деловой вестник». – № 10 (149). – 2006. – С. 32–35. 4. *Строительные нормы и правила.* Внутрихозяйственные автомобильные дороги в колхозах, совхозах и других сельскохозяйственных предприятиях и организациях. СНиП 2.05.11–83. – 27 с. 5. *Стоян Ю. Г.* Основная задача геометрического проектирования. – Харьков: ИПМаш АН УССР, Препринт № 181. – 1983. – 36 с. 6. *Мельник В. И., Чигирин А. Г., Миронов П. А.* Анализ задачи выбора оптимального направления сплошной обработки поля с учетом его рельефа // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. – 2003. – Вип. 20. – С. 285–296. 7. *Крыжачковский Н., Трагов В.* Анализ разрабатываемых систем «точного земледелия» // Труды Таврической государственной академии. – Вып. 1. – Том 10. – 1999. – С. 63–69. 8. *Мельник В. И., Золотухин А. Е.* Выбор оптимального направления сплошной



обработки поля // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1997. – № 3. – С. 27–28. 9. Шаповалов В. Д. Автоматика топоориентированных технологий растениеводства // Техника в сельском хозяйстве. – 2001. – № 1. – С. 3–5. 10. Рвачев В. Л. Геометрические приложения алгебры логики. – Киев: Техніка, 1967. – 212 с. 11. Стоян Ю. Г., Гиль Н. И. Методы и алгоритмы размещения плоских геометрических объектов. – Киев.: Наукова думка, 1976. – 245 с.

*Поступила в редколлегию 26.03.07*

УДК 629.783

**В. Б. УСПЕНСКИЙ**, канд. техн. наук,  
**А. Д. АСЮТИН**, студент НТУ «ХПИ»

### **РАЗРАБОТКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МОДЕЛИ ВРАЩЕНИЯ УПРУГОГО КЛА, УПРАВЛЯЕМОГО С ПОМОЩЬЮ СИСТЕМЫ ГИРОДИНОВ**

Розроблено обчислювальну модель обертання пружного КЛА з гіросиловою системою управління орієнтацією та стабілізацією (СУОС), яка містить власно модель обертання КЛА, моделі датчиків та виконавчих органів системи управління та модуль алгоритмів математичного забезпечення СУОС. Розроблена модель призначається для тестування та аналізу алгоритмів СУОС, що проєктуються. Наведено зразок її використання

Разработана вычислительная модель вращения упругого КЛА с гиросиловой системой управления ориентацией и стабилизацией (СУОС), которая содержит собственно модель вращения КЛА, модели датчиков и исполнительных органов системы управления и модуль алгоритмов математического обеспечения СУОС. Разработанная модель предназначается для тестирования и анализа алгоритмов проектируемых СУОС. Приведен пример ее использования.

The calculable model of rotation of resilient Spacecraft (SC) with power gyroscopic control system by the orientation and stabilizing (CSOS) is developed. The model contains own model of rotation of SC, models of sensors and executive branches of the system management and module of algorithms of the mathematical providing of CSOS. The target of developed model is testing and analysis of algorithms of CSOS, which are designed. The example of the use of model is resulted.

Одним из этапов создания нового программно-математического обеспечения бортовых систем космических летательных аппаратов (КЛА), является отработка проектируемых алгоритмов на различных стендах. Статья посвящена вопросам построения и использования «исследовательского стенда» системы управления ориентацией и стабилизации (СУОС) КЛА, предназначенного для проверки теоретической концепции, полагаемой в основу разрабатываемых алгоритмов, их работоспособности и получения предварительных оценок эффективности функционирования в составе СУОС.

В [1,2] описан специальный многофункциональный программный комплекс, созданный для решения подобных задач и использованный, в

частности, при создании системы управления спутника дистанционного зондирования «Ресурс-ДК». В данной статье отражены собственные результаты, полученные авторами в этом направлении с учетом ограниченных требований к «исследовательскому стенду». Таким образом, цель данной работы можно сформулировать как задачу построения достаточно простой вычислительной модели управляемого вращения упругого КЛА, учитывающей наиболее значимые факторы, влияющие на эффективность управления, и ее использование для тестирования различных алгоритмов СУОС.

Структурная схема моделирующего стенда включает в себя следующие блоки (см. рис. 1): модель вращения упругого КЛА, модель датчиков угловой скорости (ДУС) и гироскопов (ГД), а также блок алгоритмов СУОС: определения скорости вращения и ориентации КЛА и управления ГД. Кратко остановимся на описании каждого блока и методике проверки его адекватности.

В соответствии с [3] КЛА с упругими элементами (панели, антенны и т.п.) моделируется в виде жесткого ядра с присоединенными к нему стержнями. Из инженерной практики известно, что такая модель адекватна, когда центральное ядро существенно массивнее упругих элементов конструкции.

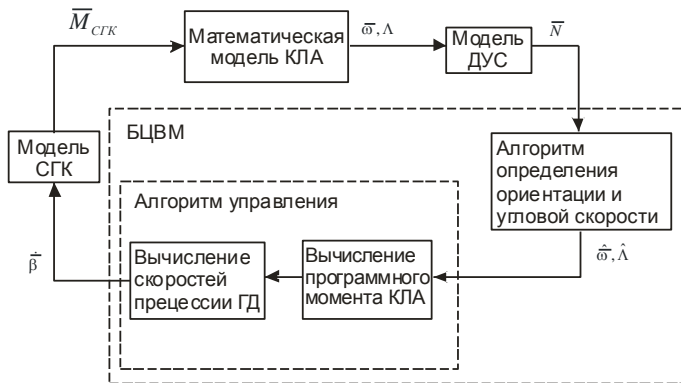


Рис. 1 – Структурная схема моделирующего стенда КЛА

Ориентация жесткого ядра КЛА в пространстве задается кватернионом, а деформация стержня характеризуются отклонением упругого элемента от положения в недеформированном состоянии. В этих условиях математическая модель упругого КЛА имеет вид

$$\begin{cases} \dot{\Lambda} = \frac{1}{2} \Lambda \circ \bar{\omega}; \\ I \dot{\bar{\omega}} + (\bar{\omega} \times I \bar{\omega}) = \bar{M}_{СГК} + M_B + L \ddot{\bar{x}}; \\ \ddot{\bar{x}} + K \dot{\bar{x}} + C \bar{x} = Q \dot{\bar{\omega}}. \end{cases} \quad (1)$$

где  $I$  – матрица моментов инерции КЛА;  $L$  – матрица влияния упругих элементов на движения жесткого ядра;  $Q$  – матрица влияния движения жесткого ядра на динамику упругих элементов;  $\bar{x}$  – вектор деформации упругих элементов. Первые два уравнения описывают динамику жесткого ядра КЛА. Последнее уравнение описывает динамику упругих элементов.

Учитывая высокий порядок системы (в модельном примере - 32) и ее нелинейность, получить аналитическое решение оказывается затруднительным, поэтому для моделирования вращения КЛА применяется процедура численного интегрирования. Было установлено, что устойчивость численного интегрирования такой системы при характеристиках объекта и исходных данных, близких к реальным, обеспечивается методом Рунге-Кутты 4-го порядка с шагом 0.01 с. Разработанный модуль был протестирован на модельном вращении, имеющем аналитическое описание.

В составе модели СУОС была реализована модель ДУС с дискретным выходом, включающая такие инструментальные погрешности, как дрейф гироскопа, погрешность масштабного коэффициента, несоосность осей чувствительности и осей связанной с КЛА системы координат (ССК). Моделирование информационного выхода ДУС осуществляется по формуле

$$\bar{N}_n = \text{Entier} \left( K^{-1} \int_0^{t_n} (G^{-1} \bar{\omega} + \delta \bar{\omega}) dt \right), \quad (2)$$

в которой  $\bar{\omega}$  - вектор истинной угловой скорости,  $\delta \bar{\omega}$  - вектор дрейфа ДУСов,  $G^{-1}$  - матрица преобразования ССК к системе осей чувствительности ДУСов,  $K$  - диагональная матрица масштабных коэффициентов преобразования аналогового сигнала к дискретному. Указанные параметры соответствуют своим истинным значениям. Для использования в алгоритмах определения текущей скорости и ориентации КЛА вычисляется оценка вектора приращения угла кажущегося поворота

$$\nabla \bar{\theta}_n = \hat{G} (\hat{K} \cdot \nabla \bar{N}_n - \delta \hat{\omega} \cdot \Delta t), \quad (3)$$

в которой  $\nabla \bar{N}_n = \bar{N}_n - \bar{N}_{n-1}$ ,  $\hat{G}, \delta \hat{\omega}, \hat{K}$  - оценка одноименных параметров инструментальных погрешностей, известная с некоторой погрешностью,  $\Delta t = t_n - t_{n-1}$  - такт работы алгоритмов определения ориентации. Отличие оценок инструментальных погрешностей от их истинных значений, а также

операция взятия целой части в (2) обуславливают погрешность измерений и первичной обработки информации с ДУС.

Исполнительным устройством рассматриваемой СУОС является силовой гироскопический комплекс (СГК). Вычислительная модель СГК представляет собой алгоритм, на вход которого поступают расчетные, или требуемые, значения скорости прецессии ГД (управление)  $\dot{\beta}$ , а на выходе формируется вектор динамического момента, воздействующий на корпус КЛА. Такое преобразование осуществляется в соответствии с выражением

$$\bar{M} = L(\bar{\beta}) \cdot \dot{\beta} - \bar{\omega} \times \bar{H}_{\Sigma}(\bar{\beta}), \quad (4)$$

в котором  $\bar{\beta}$  - вектор текущих значений углов прецессии ГД,  $\bar{H}_{\Sigma}$  - суммарный кинетический момент СГК,  $L = \frac{\partial \bar{H}_{\Sigma}}{\partial \bar{\beta}}$  - якобиан,  $\dot{\beta} = \mathfrak{R}(\dot{\beta})$  - вектор реализуемых скоростей прецессии ГД, связанный с расчетным вектором управления некоторым нелинейным преобразованием, учитывающим особенности реальных ГД и вносящим дополнительную погрешность.

Центральным с точки зрения решения целевой задачи является модуль исследуемых алгоритмов обработки информации, впоследствии реализуемых в составе ПМО СУОС. Он включает в себя оценку мгновенной угловой скорости вращения КЛА, алгоритмы вычисления ориентации по информации ДУСов и алгоритмы управления.

В рассматриваемой реализации угловая скорость по данным (3) определяется в соответствии с методом Ньютона, кватернион ориентации - по алгоритму 3-го порядка, изложенному в [4]. Для тестирования и оценки точности этих алгоритмов вычисленные результаты сравнивались с эталонными значениями, формируемыми моделью вращения КЛА (1) (см. рис.2). Здесь приведены графики относительной погрешности оценки угловой скорости и угловой меры кватерниона рассогласования между вычисленной и эталонной ориентацией.

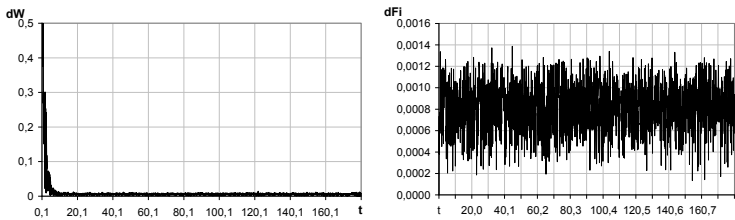


Рис. 2 – Погрешности значений угловой скорости и кватерниона ориентации

Из графиков, в частности, видно, что на начальном этапе погрешность вычисления угловой скорости велика, что связано со значительным возмущением со стороны упругих элементов. Далее, по мере затухания колебаний упругих элементов, методическая ошибка становится незначительной, что говорит о достаточной точности реализованных алгоритмов. Заметим также, что как для оценки угловой скорости, так и для ориентации, при отсутствии возмущений погрешность носит шумовой характер, что объясняется случайной ошибкой, вносимой дискретизацией измерений ДУС и косвенно свидетельствует об отсутствии ошибок программной реализации алгоритмов.

Далее, блок гиросилового управления состоит из следующих алгоритмов [5]: вычисление программного момента; вычисление из условия устойчивой реализации программного вращения поправок к программному моменту с учетом измеренной угловой скорости и ориентации КЛА; вычисление требуемых скоростей прецессии ГД, обеспечивающих реализацию динамического момента; сглаживание вычисленных скоростей прецессии с помощью цифрового фильтра низких частот.

В качестве примера использования разработанной вычислительной модели опишем проведенный вычислительный эксперимент.

Для выбора наилучшего было реализовано четыре алгоритма управления СГК, изложенных в [5]: простейший алгоритм с псевдообратной матрицей; алгоритм на основе минимизации равномерной нормы вектора управления с реконfigurацией СГК; алгоритм с градиентной добавкой и алгоритм с использованием сингулярно-робастного псевдообращения матрицы Грамма. В качестве критериев эффективности алгоритмов принимались следующие показатели: конфигурация СГК в конце маневра; терминальная погрешность ориентации и угловой скорости, отражающая точность выполнения заданных конечных условий маневра. Моделировалось два режима работы СУОС: режим переориентации и режим перезакрутки. Меняя планируемое время маневра от 90 до 180 секунд, проанализирована эффективность алгоритмов управления в каждом из режимов, после чего отобраны два наиболее конкурентоспособные: алгоритм на основе минимизации равномерной нормы с реконfigurацией и алгоритм с сингулярно-робастным псевдообращением матрицы. Для краткости в дальнейшем будем их называть соответственно «первым» и «вторым» алгоритмом.

Алгоритмы сравнивались по значению определителя матрицы Грамма в конце маневра. Рассматривая зависимость этого критерия от планируемой продолжительности маневра в двух режимах работы СУОС (см. рис.3) видно, что при малых продолжительностях маневра практически везде более эффективным является 1-й алгоритм, при значительной продолжительности алгоритмы эквивалентны.

С другой стороны, по величине погрешности реализации терминальных условий ориентации однозначно выделить лучший во всех случаях алгоритм по приведенным результатам моделирования нельзя (см. рис.4).

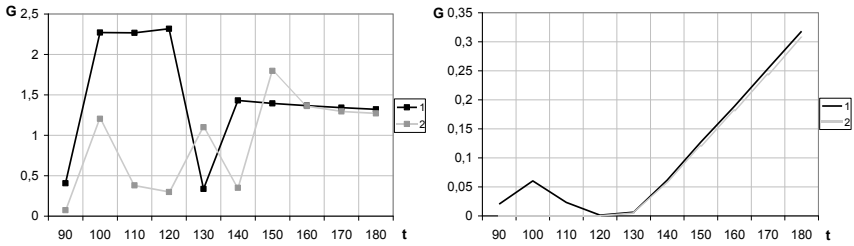


Рис. 3 – Зависимость определителя матрицы Грама от продолжительности маневра

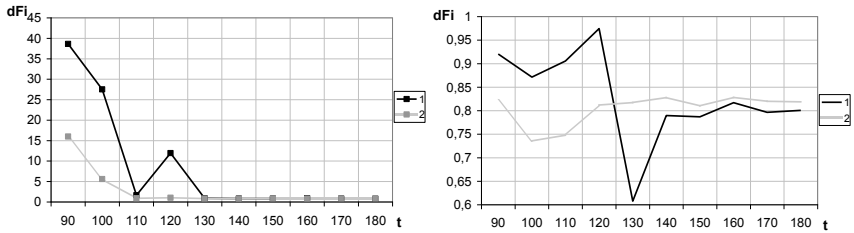


Рис. 4 - Зависимость терминальной погрешности ориентации от продолжительности маневра.

Таким образом, разработанная вычислительная модель может служить инструментом для предварительного тестирования и анализа алгоритмов СУОС упругого КЛА. Программная реализация стенда при необходимости допускает модификацию любого модуля, в том числе в сторону детализации и усложнения математических моделей.

**Список литературы:** 1. Бутырин С.А., Герасин С.А., Герасин И.А., Сомов Е.И. Технология создания моделей и задач в системе ДИНАМИКА // Программные продукты и системы, 1999, N 1, с. 38-41. 2. Сомов Е.И., Бутырин С.А., Герасин С.А., Герасин И.А. Программное средство ДИНАМИКА в имитации гиросиловых отказоустойчивых систем управления ориентацией космических аппаратов // Навигация и гироскопия, 1999, N 2(25), с. 92-107 3. Дегтярев Г. Л., Сиразетдинов Т.К. Теоретические основы оптимального управления упругими космическими аппаратами. М.: Машиностроение. - 1986. - 214 с. 4. Бранец В.Н., Шмыглевский И.П. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела. М.: Наука. - 1973. - 320 с. 5. Успенский В.Б. Теоретические основы гиросилового управления ориентацией космического летательного аппарата. Монография. – Харьков: НТУ «ХПИ». - 2006. – 328с.

Поступила в редколлегию 19.03.07

*Н.И. БЕЗМЕНОВ*, канд. техн. наук, *А.С. ПАНЧЕНКО*, студентка,  
*О.С. КУРАПОВА*, студентка

## **ВИЗУАЛИЗАЦИЯ АРХИВНЫХ ДАННЫХ ИНФОРМАЦИОННО- ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ**

У статті розглядається інформаційна технологія, яка розроблена для вирішення питання візуалізації архівних даних на атомних електростанціях. Наведені головні методи, які використовуються для реалізації проекту, та доведена доцільність створення ексклюзивного програмного продукту для АЕС.

В статье рассматривается информационная технология, которая разработана для решения задачи визуализации архивных данных на атомных электростанциях. Приведены главные методы, которые используются для реализации проекта, и доказана необходимость разработки эксклюзивного программного продукта для АЭС.

In article the information technology which is developed for the decision of a problem of visualization of contemporary records on atomic power stations is examined. The main methods which are used for realization of the project are brought, and necessity of development of exclusive software product for the atomic power station is proved.

**Введение.** Проблема графического отображения данных большей частью решена общеизвестными пакетами и включена в качестве приложения в библиотеки входящие в состав некоторых программных оболочек. Учитывая специфические факторы работы системы архивации данных на атомных электростанциях (АЭС), а так же требования пользователей к максимальной скорости обеспечения визуализации, несомненной является необходимость в значительной мере дополнить и расширить возможности готовых приложений, выполняющих графическую визуализацию данных.

**Постановка задачи.** Требуемая разработка обладает спецификой, которая позволяет использовать ее только среди узкого круга пользователей – технологов АЭС. Они должны получить программный продукт, визуализирующий процессы, протекающие на станции, который можно изменять, дополнять, расширять функциями, предложенными в процессе эксплуатации. Так характеристики всех процессов, включая аварийные, хранятся в архивных файлах специальной структуры, возникает отдельно стоящая проблема – создание программы, обеспечивающей максимальную скорость визуализации имеющегося архива. Скорость визуализации – решающий фактор, так как он позволяет технологам принимать важнейшие решения, устранять технические неполадки в кратчайшие сроки.

**Структура архивных файлов.** АЭС представляет собой огромную и сложную систему, содержащую оборудование, оснащенное большим количеством датчиков, предоставляющих информацию технологам. Скорость

предоставления этой информации и качество её визуализации имеют решающее значение при принятии решений персоналом в нештатной ситуации [1].

В информационно-вычислительной системе (ИВС) АЭС непрерывно осуществляется запись значений параметров в архивные файлы. В случае возникновения аварии эти файлы используют при анализе ситуации. Структура архивов в разных ИВС АЭС может несколько отличаться, но общие принципы соблюдаются.

Штатная ИВС со своими программными и техническими средствами предназначена для длительного срока эксплуатации. Она создавалась достаточно давно, когда объемы памяти, включая внешние носители, были невелики, и прилагались определенные усилия для ее экономии. Этим объясняется сложность структур данных и ограниченность в возможности их визуализации. Постоянно обновляющиеся современные программные средства обеспечили возможность представления архивной информации технологам в совершенно обновленном виде.

Существуют два типа параметров, фиксируемых в ИВС АЭС: аналоговые (принимающие различные значения, соответствующие установленным для каждого из них шкалам) и дискретные (параметры состояния арматуры, механизмов, ключей). Во всех процессах энергоблока фигурируют несколько тысяч аналоговых параметров и в несколько раз больше дискретных. Учитывая принципиальную разницу в структуре значений аналоговых и дискретных параметров, архивация их производится в файлы различной структуры.

В процессе записи в архивный файл аналоговых параметров сначала записывается значение времени, а затем шифры (адреса подключения к ИВС) и значения параметров, соответствующие данному моменту времени. Зная структуру архивного файла, можно разработать алгоритм чтения значений для последующей визуализации архива.

**Формат X.** Метод хранения данных, предназначенный для размещения значения аналогового параметра (вещественного числа) в двух байтах [2].

Пусть имеется 16-разрядное знаковое целое число. Его структура имеет следующий вид:

1 111 111111111111  
S N M

Здесь  $S$  – знаковый бит (0 – положительное число, 1 – отрицательное);

$N$  – порядок (число в диапазоне 0..7);

$M$  – мантисса (число в диапазоне 0..4095).

Вещественное число  $R$  вычисляется на основании показателя степени

$$d = 2 - N. \tag{1}$$



Если  $S = 0$ , то

$$R = M \cdot 10^d, \quad (2)$$

если  $S = 1$ , то

$$R = -M \cdot 10^d. \quad (3)$$

Дискретные параметры ИВС бывают так называемыми однопозиционными и двухпозиционными; при этом в роли однопозиционных значений выступают следующие события, кодируемые значениями 1 и 0:

1. Сигнал аварии: 1 – «Да», 0 – «Нет».
2. Включение \ выключение ключа: 1 – «Включен», 0 – «Отключен».
3. Сигнализация о выходе значения аналогового параметра за рамки установленных границ: 1 – «Да», 0 – «Нет».

Двухпозиционными значениями являются следующие состояния с возможными комбинациями значений 00, 10, 01, 11:

1. Арматура (задвижки), состояния: 10 – «Открыто», 01 – «Закрыто», 11 – «Ход», 00 – «Недостоверность».
2. Механизмы (двигатель насоса): 10 – «Включен», 01 – «Отключен», 00 – «Недостоверность».

Фиксация дискретных параметров в архив носит событийный характер, то есть в архив заносятся шифр и новое состояние одного сигнала. Остается определить, к какому конкретному параметру относится это событие. За это распознавание отвечает база данных паспортных значений параметров.

**Основной метод вывода графиков.** В процессе разработки программы визуализации нужно учесть то, что перед началом построения графиков для них необходимо установить границы временного интервала, что существенно экономит время работы программы. Это также объясняется тем, что технологов, использующих программу визуализации данных, интересует конкретный, относительно небольшой промежуток времени.

Но даже в случае малого интервала построения может сложиться ситуация, когда значений параметра, попадающих в этот интервал, очень много – количество точек построения по оси абсцисс может значительно превышать количество самих точек оси абсцисс графика.

В таком случае возникает одна из основных проблем поставленной задачи – разработка метода построения точек на графике, в случае, когда их количество велико. Основным требованием к методу является то, что на графике всегда должны присутствовать экстремальные значения при любом количестве зафиксированных в файле значений для требуемого визуализируемого участка времени.

Предположим, что выборка записей из архивного файла, требуемого для визуализации параметра на указанном участке времени, уже составлена. Далее  $X$  и  $Y$  – поля времени и значения параметра для текущей записи.

Пусть

$m$  – общее число временных точек, зафиксированных в архивном файле на требуемом временном интервале построения по оси абсцисс;

$n$  – общее число точек оси абсцисс – пикселей экранной области построения графика.

Если,  $n \geq m$  то график приобретает тривиальный вид – все значения визуализируемого параметра выводятся на экран, при этом расстояние между двумя соседними точками оси абсцисс может масштабироваться для того, чтобы график занял всю область построения.

Если  $m$  превышает  $n$ , то на каждую точку абсцисс графика приходится группа из  $\frac{m}{n}$  точек значений параметра. Следовательно, каждая группа записей поочередно записывается в список, из которого в последствии выбираются всего четыре записи. Они выбираются по таким признакам:

- с минимальным значением  $X$  (начальное временное значение в текущем списке);
- с максимальным значением  $X$  (конечное временное значение в текущем списке);
- с минимальным значением  $Y$  (нижний экстремум в текущем списке);
- с максимальным значением  $Y$  (верхний экстремум в текущем списке).

Таким образом, получаем четыре записи (в случае совпадения каких-либо из приведенных выше значений их получится меньше). Значения  $Y$  полученных записей выводятся на график по оси ординат, соединяются – они будут соответствовать текущей точке абсцисс. Такие действия производятся для каждой точки оси абсцисс. С каждым шагом, полученный вертикальный отрезок соединяется со следующим посредством точки с максимальным значением поля  $X$  слева и точки с минимальным значением поля  $X$  справа (на рисунке – это отрезок  $C_1 - B_2$ ).

Следует учесть, что расстояние между двумя соседними точками оси абсцисс равно одному пикселю, поэтому соединение двух точек, находящихся в двух соседних пикселях по оси абсцисс может привести к небольшому искажению графика. Но в случае, когда используется данный метод, речь идет о возможности просмотра движения процесса в целом, что позволяет увидеть время и размер сбоя движения. Для подробного анализа пользователей производится увеличение интересующего его участка. При этом можно увеличить весь график и просматривать его, используя скроллер.

На рисунке приведен схематический пример построения точек по оси ординат (значения параметра) соответствующие двум соседним точкам  $X_1$  и  $X_2$  оси абсцисс  $X$  (временной оси). Считаем, что процесс шел стабильно до

точки  $X_1$  графика, то есть все 4 полученных значения для каждой точки оси абсцисс были равны. В точке  $X_1$  произошел разброс и, начиная с нее, процесс становится нестабильным.

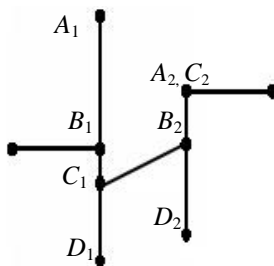


Схема вывода точек в данный момент времени

На рисунке приняты следующие обозначения:

$A_1$  – максимальное значение параметра для координаты  $X_1$ ;

$B_1$  – значение параметра, соответствующее первому временному значению для координаты  $X_1$ ;

$C_1$  – значение параметра, соответствующее последнему временному значению для координаты  $X_1$ ;

$D_1$  – минимальное значение параметра для координаты  $X_1$ .

Точки  $A_2, B_2, C_2, D_2$  соответствуют координате  $X_2$ . Как видно из рисунка, Точки  $A_2$  и  $C_2$  совпадают, т.к. запись с последним временным значением и запись с максимальным значением параметра имеют одно значение  $Y$ .

Таким образом, при обработке архивных файлов приведенный метод позволяет в любом временном промежутке строить графики изменения параметров с большим количеством точек без потерь экстремальных значений.

**Выводы.** Решая основную задачу визуализации архивных значений технологических параметров - контроль режимов работы технологического оборудования энергоблока и анализ процессов, происходивших на этом оборудовании, данный метод позволяет программе формировать в графическом виде свои выходные данные на мониторах клиентских ПЭВМ в наиболее удобном для технологов виде.

**Список литературы:** 1. Балакан Г. Международный Семинар. Системы Представления Параметров Безопасности для ВВЭР-1000 22-24 мая 2001г. Функциональные особенности проектов СППБ для РУ В-302, В-338, В-320 ЮУ АЭС. – Южноукраинская АЭС, 2001.  
2. Симонов В.В. Система передачи данных Ростовской АЭС. ГУ ДП ГП ВНИИАЭС, 1997.

Поступила в редколлегию 12.01.07

**Е.Ю. КОСАРЕВ**, студент НТУ «ХПИ»

## **ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ**

Статья посвящена изложению способа распознавания звуковых сигналов нейронной сетью с использованием спектрального анализа методом Монте-Карло, что позволяет уменьшить вычислительные затраты по сравнению с классическим спектральным анализом.

Стаття присвячена викладенню способу розпізнавання звукових сигналів нейронною мережею з використанням спектрального аналізу методом Монте-Карло, що надає можливість зменшити обчислювальні витрати у порівнянні з класичним спектральним аналізом.

Article is dedicated to method of identification of sound signals by neural network using spectral analysis with Monte-Carlo. This provides decreasing of calculations as compared with classical spectral analysis.

Создание высокоавтоматизированных трудосберегающих производств предполагает автоматизацию не только физического, но и интеллектуального труда человека. Автоматизация интеллектуальной деятельности потребовала решения ряда новых задач, не возникавших ранее. К их числу относятся описание и представление в ЭВМ сложной внешней среды, автоматическое планирование и выполнение комплекса разнообразных действий технического устройства, направленных на достижение заданной цели, организация общения человека с ЭВМ на языке, близком к естественному, и ряд других.

Идентификация звуковых сигналов относится к разряду интеллектуальных инженерных задач и является одной из наиболее перспективных. Область применения системы, решающей данную задачу, довольно широка – это робототехника, системы управления ЭВМ с помощью речи, криминалистика, системы безопасности и др.

В данной статье описан математический аппарат системы распознавания звуковых сигналов, которая программно реализуется на ЭВМ. Рассматриваются звуковые сигналы, продолжительность звучания которых ограничена 6-10 секундами и имеется обучающая выборка – шаблон, в котором образцам звуковых сигналов соответствуют классы, к которым они принадлежат. Требуется идентифицировать неизвестный звуковой сигнал – отнести его к одному из классов, существующих в шаблоне, либо отнести к классу неизвестных.

Процесс физиологического распознавания речи может быть промоделирован с помощью электронных устройств (рис. 1), где каждому этапу обработки информации в живом организме соответствует определенная техническая операция [1].



Рисунок 1 – Этапы распознавания звуковых сигналов

Выбор типа датчика зависит от ряда условий: наличие шума, требования к направленности и т. д. Спектральный анализ позволяет определить функцию, выполняемую ушной улиткой, сводящуюся к определению интенсивности сигнала в зависимости от частоты. Выделение свойств, т.е. характерных элементов, осуществляют совместно улитка, слуховой нерв и кортиев орган. Наконец, на верхнем уровне, в коре головного мозга, происходит понимание сообщения.

Как видно, реализация системы распознавания звуковых сигналов сводится к следующим подзадачам: разработка и реализация процедуры спектрального анализа, разработка и выбор метода выделения свойств на основе спектра, реализация процедуры распознавания.

Сигнал, записанный через микрофон, подключенный к звуковой карте из аналогового преобразуется в цифровой путем дискретизации. Это реализовано на низком уровне – аппаратном и системном уровне драйверов звуковой карты. Вследствие дискретизации вектор, описывающий сигнал имеет очень большую размерность. Так при частоте дискретизации 11025 Гц десять секунд звукового сигнала будет описывать вектор из 110250 значений, при чем надо учитывать, что частота дискретизации 11025 Гц довольно невысокий показатель для современной цифровой звукозаписи. Это значит, что вектор, описывающий такой небольшой промежуток времени, как десять секунд, может иметь и большую размерность. Для систем распознавания векторы таких размерностей неприемлемы, так как распознавание и обучение будут требовать очень много вычислительного времени и ресурсов. Следовательно, исходная задача разбивается на две подзадачи – выделение «квинтэссенции» сигнала и её последующее распознавание. Под «квинтэссенцией» будем понимать некий набор свойств (признаков),

объединяющий сигналы в общее множество – образ. Каждое отдельное проявление из множества объединенных в образ будем называть изображением.

Как было сказано выше, дискретизированный звуковой сигнал требует некоторого преобразования, которое выделит его свойства, на основании которых, сигналы можно будет объединять в образы. Для субъективного распознавания любого звука основную роль играют две его характеристики – высота и тембр [1].

Высота характеризует основную частоту звука.

Тембр характеризует индивидуальную «окраску» звука, присущие только ему особенности, позволяющие отличить данный конкретный звук от других, имеющих такую же интенсивность и частоту. Тембр определяется наличием гармоник, чья амплитуда должна быть достаточно заметной, чтобы внести «вклад» в восприятие звука [1]. Для выделения этих характеристик необходимо произвести спектральный анализ сигнала – выделить его спектр. Спектральный анализ – это один из методов обработки сигналов, который позволяет охарактеризовать частотный состав измеряемого сигнала. Преобразование Фурье является математической основой, которая связывает временной или пространственный сигнал (или же некоторую модель этого сигнала) с его представлением в частотной области. Любую периодическую функцию  $f(t)$  с периодом  $T$ , удовлетворяющей условиям Дирихле, можно представить с помощью тригонометрического ряда Фурье:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos k\omega_1 t + b_k \sin k\omega_1 t), \quad (1)$$

где  $\omega_1$  – частота повторения (или частота первой гармоники);

$k$  - номер гармоники

Этот ряд содержит бесконечное число косинусных или синусных составляющих – гармоник, причем амплитуды этих составляющих  $a_k$  и  $b_k$  являются коэффициентами Фурье, определяемыми интегральными выражениями:

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos k\omega_1 t dt, \quad (2)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin \omega_1 t dt. \quad (3)$$

Таким образом, выделение свойств сигнала сводится к выделению спектра сигнала с и его последующим огрублением – формированием «квинтэссенции» спектра.

Численный спектральный анализ заключается в нахождении коэффициентов  $a_0, a_1, \dots, a_{N-1}, b_0, b_1, \dots, b_{N-1}$  (или  $A_0, A_1, \dots, A_{N-1}, \varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_{N-1}$ ) для периодической функции  $f(t)$  заданной на отрезке  $[0, T]$   $N$  дискретными отсчетами. Он сводится к вычислению (2), (3) по формулам численного интегрирования для метода прямоугольников [2]:

$$a_k = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f(n) \cos(2\pi \frac{1}{N} kn), \quad (4)$$

$$b_k = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f(n) \sin(2\pi \frac{1}{N} kn), \quad (5)$$

где учтено, что  $f_1 = \frac{1}{T}$ , шаг дискретизации по оси  $x$  равен  $\Delta x = \frac{T}{N}$  и

соответственно  $2\pi f_1 n \Delta x = 2\pi \frac{1}{N} kn$ .

Найденные по формулам (4), (6) коэффициенты Фурье приближают функцию  $f(t)$  рядом (1) с меньшей квадратичной ошибкой [3]. Данный метод имеет очень большой недостаток – невысокая скорость из-за большого количества вычислений.

Получить спектр функции  $f(t)$  можно путем вычисления тех же (2) и (3), но в качестве метода интегрирования использовать метод Монте-Карло (метод статистических испытаний) с количеством испытаний меньше, чем  $N$ . Количество вычислений будет меньше, а, следовательно, скорость нахождения спектра выше.

Выбирается мажоранта – прямоугольник, стороны которого параллельны осям, а координаты вершин –  $(0, f_{abs\ max}(t))$ ,  $(0, -f_{abs\ max}(t))$ ,  $(T, f_{abs\ max}(t))$ ,  $(T, -f_{abs\ max}(t))$ , где  $f_{abs\ max}(t)$  – максимальное по модулю значение функции  $f(t)$  на промежутке  $[0, T]$ . Выбор такой мажоранты обоснован тем, что подынтегральные выражения содержат  $f(t)$  умноженную на косинус или синус. Следовательно, подынтегральная функция не выходит за рамки  $[-f_{abs\ max}(t), f_{abs\ max}(t)]$ , т.к. косинус и синус не превосходят по модулю 1. Проводится  $K$  статистических испытаний, в ходе которых генерируется две случайных величины. Одна равномерно распределенная на промежутке  $[0, T]$ , другая на промежутке  $[-f_{abs\ max}(t), f_{abs\ max}(t)]$ . В случае, если сгенерированная случайная точка находится между значением функции и осью  $x$  счетчик «удачных» испытаний  $L$ , изначально равный 0, увеличивается или уменьшается на единицу, в зависимости от знака функции. Таким образом, значения интегралов (2), (3) вычисляются по формуле:

$$I = S_{mj} \frac{L}{K}, \quad (6)$$

$$S_{mj} = T(f_{\max}(t) - f_{\min}(t)). \quad (7)$$

Полученные значения по (6) умножаются на  $\frac{2}{T}$  в соответствии с (2), (3).

Точность и скорость работы метода зависят от количества испытаний  $K$ . При чем скорость зависит прямопропорционально, а точность обратнопропорционально.

Для подсчета точности работы метода с использованием интегрирования методом Монте-Карло использовался функционал невязки:

$$\Omega = \frac{\sum_{i=0}^R |\bar{s}_i - s_i|}{R}, \quad (8)$$

где  $R$  – размерность массива, описывающего спектр (массива амплитуд) в нашем случае  $R = 5492$ ;

$\bar{s}$  – массив амплитуд, полученный методом Монте-Карло;

$s$  – массив амплитуд, полученный классическим спектральным анализом.

Так как метод Монте-Карло статистический, то для построения графика использовались средние значения ошибки. Изменение точности работы метода на рис. 2

Из приведенного выше следует, что последовательный численный спектральный анализ с использованием интегрирования по методу прямоугольников хоть и дает высокую точность, но требует намного больше вычислений и времени, чем метод Монте-Карло. Метод Монте-Карло требует намного меньше времени, но при этом вносится погрешность. Время работы метода возрастает линейно от количества испытаний, а ошибка уменьшается нелинейно. Цель данного звена системы не точное вычисление спектра, а выделение характерных признаков сигнала. С учетом того, что для распознавания важна скорость работы метода, можно сделать вывод, что метод Монте-Карло является наиболее подходящим.



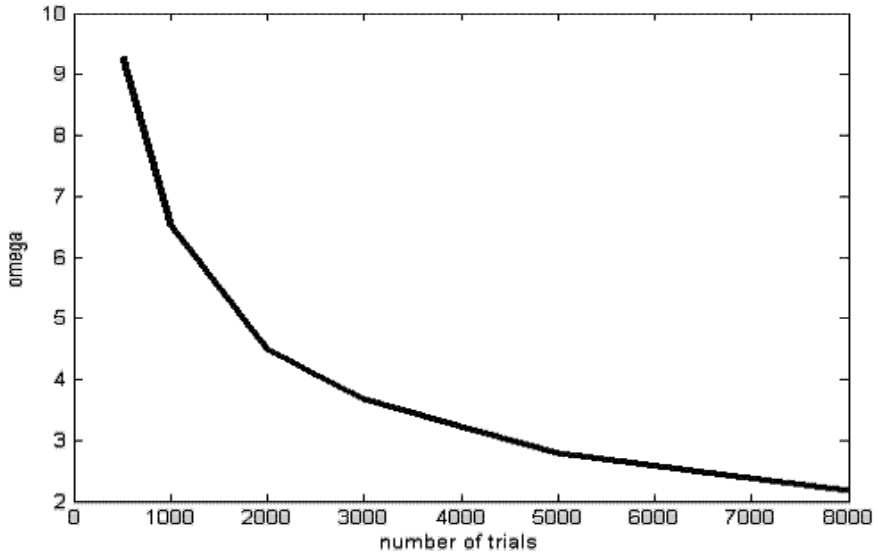


Рисунок 2 – Изменение ошибки вычисления спектра с использованием Монте-Карло от количества испытаний.

Рассмотрим методы выделения свойств из полученного спектра.

Вектор  $s = (A_1, A_2, \dots, A_K)$ , описывающий спектр, также имеет большую размерность. Выделить свойства сигнала на основе спектра можно несколькими способами: выделить  $M$  больших гармоник (рис. 3), составить вектор средней спектральной плотности по полосам частот (рис. 4) с количеством полос  $L$  и их шириной  $\psi(l)$  (постоянной или переменной), где  $l$  – номер полосы.

Алгоритм метода выделения больших гармоник заключается в последовательном прохождении вектора  $S$ , описывающего спектр, с запоминанием частот и амплитуд больших гармоник в отдельном векторе.

Алгоритм вычисления вектора средней спектральной плотности по полосам частот заключается в последовательном прохождении вектора, описывающего спектр  $S$ , с накоплением сумм в каналах  $k_1, k_2, \dots, k_L$  и последующем делении значений  $k_1, k_2, \dots, k_L$  на соответствующие  $\psi(l)$ . Смена канала происходит при переходе в следующую полосу.

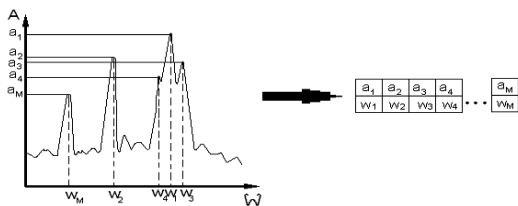


Рисунок 3 – Выделение M больших гармоник.

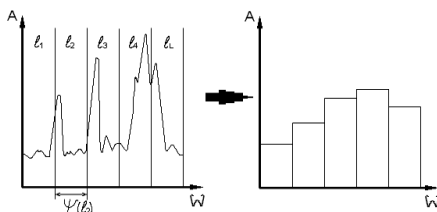


Рисунок 4 – Составление вектора средней спектральной плотности по полосам частот.

Для распознавания использовалась двухслойная нейронная сеть прямого распространения со входным слоем, содержащим  $l$  нейронов (по количеству признаков) и варьируемым выходным слоем (в зависимости от количества распознаваемых образов). Т.к. на выходе нейрон выдает ноль или один, то количество нейронов выходного слоя можно описать формулой:

$$N = \log_2 K, \tag{9}$$

где  $N$  – число нейронов;

$K$  – количество распознаваемых образов.

Схема нейрона



Рисунок 5 – Структура искусственного нейрона.

Входной оператор преобразует взвешенные входы и подает их на оператор активации. В качестве входного оператора использовалась сумма взвешенных входов:

$$f(x, w) = \sum_{i=1}^N w_i x_i . \quad (13)$$

В качестве функции активации – функция единичного скачка.

Для нейронов первого слоя входными сигналами является взвешенная сумма вектора признаков. Входными сигналами нейронов второго слоя являются выходные сигналы предыдущего слоя (рис. 6).

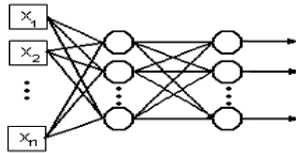


Рисунок 6 – Архитектура нейронной сети

Особенностью данной сети является способность к обучению ее весовых коэффициентов. В режиме обучения ей предъявляют образы – обучающие пары  $(x, y^*)$ , на основании которых она настраивает свои параметры так, чтобы при появлении некоторого входного вектора  $x$  на его выходе появлялись соответствующие этому входу сигналы  $y$ . Процесс обучения заканчивается, когда все пары  $(x, y^*)$  ассоциируются правильно. Алгоритм обучения нейронной сети реализует способ обучения с учителем, при котором ошибка минимизируется [4].

Компьютерная программа, реализующая данный метод, может распознавать сигналы от различных источников. Тестовым примером является распознавание звуков флейты, электрогитары и классической гитары. После обучения программа может распознавать неизвестные сигналы: относить их к одному из трех известных классов или к классу «неизвестный сигнал».

Данная работа является логически законченным исследованием, но может быть использована как база для последующих исследований в данном направлении.

**Список литературы:** 1.Фор А. Восприятие и распознавание образов – М: Машиностроение, 1989. 2.Мазманишвили А.С., Шкварко Ю.В. Методические указания к лабораторным занятиям по курсу «Численные методы», часть 2: «Численные методы прикладного анализа» – Х: ХПИ, 1992 3.Корн Г., Корн Т. Справочник по математике – М: Наука, 1973. 4. Руденко О.Г., Бодянский Е.В. Основы теории искусственных нейронных сетей – Х: ТЕЛЕТЕХ, 2002.

Поступила в редколлегию 27.04.07

**В.И. САЕНКО**, канд. техн. наук, проф. каф. ИУС, ХНУРЭ,  
**А.С. ГОЛУБЕВ**, аспирант каф. ИУС, ХНУРЭ

## **МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ КАЧЕСТВА ИНФОРМАЦИОННЫХ СЕРВИСОВ В КОРПОРАТИВНОЙ СЕТИ**

Розглядаються питання оцінювання якості сервісів у корпоративній мережі. Показаний зв'язок методів оцінювання якості з показниками стану сервісів, запропоноване узагальнення методу оцінювання для випадків однорідних і неоднорідних сервісів. Правильність отриманих рішень підтверджується на прикладах.

Рассматриваются вопросы оценивания качества сервисов в корпоративной сети. Показана связь методов оценивания качества с показателями состояния сервисов, предложено обобщение метода оценивания для случаев однородных и неоднородных сервисов. Правильность полученных решений подтверждается на примерах.

It is considered evaluation qualities of services questions in a corporate network. It is shown the relation of qualities evaluating methods with state parameters of services, the generalization of the evaluation method for cases of homogeneous and heterogeneous services. Correctness of the received solutions is proved by examples

### **Описание проблемы и анализ известных результатов исследований.**

Корпоративные сети сегодня становятся неотъемлемой частью информационной структуры крупных предприятий. Сложность корпоративных компьютерных сетей делает актуальными вопросы повышения эффективности использования имеющихся информационных ресурсов и повышения качества обслуживания QoS (Quality of Service) пользователей. Каждый сервис потребляет ресурсы и требует определенных затрат на его поддержку, поэтому актуальными являются также вопросы сравнительного анализа сервисов и прежде всего, оценивания их качества.

Сложность решения задачи оценивания качества сервиса связана с тем, что показатель качества - это безразмерная единица, определяемая на основе некоторых множественных интегральных переменных. Оценки, полученные для разных сервисов, могут быть совершенно не совместимы, хотя и успешно характеризовать каждый сервис в отдельности. Возникает задача - как формировать такие оценки, чтобы можно было сравнивать разные сервисы между собой или одинаковые сервисы, но используемые в разных условиях.

Эта задача актуальна для разных типов сетей и часто рассматривается на конференциях и в статьях, например, [1], [2], [3], [4].

Большая часть работ посвящена получению частных решений для конкретных сервисов, например, [2], [4]. В частности, в [2] рассмотрен способ определения и сравнения качества JMS (Java Messaging Service - сервис сообщений Java) сервисов, а в [4] рассматриваются вопросы управления сервисом баз данных. Такие решения не позволяют получить обобщенный

формальный аппарат вычисления оценок для случаев множества разных сервисов. Множественность сервисов – это типовая ситуация для большинства компьютерных сетей.

Некоторые работы посвящены оцениванию состояния отдельного сервиса для обеспечения наилучших локальных условий, например, [3] и не позволяют учесть влияния условий при которых реализуются данный сервис.

Наиболее интересным с точки зрения рассматриваемых условий оценивания сервисов представляется решение, предложенное в [1]. В то же время остаются нерешенным вопросы формализации метода оценивания сервисов для оперативного контроля при условии специфики их реализации и некоторые очевидные факты были не учтены. В частности, связь получаемых оценок с условиями в которых используется этот сервис.

*Цель статьи* сводится к поиску путей оценивания сервисов компьютерных сетей, позволяющих учитывать различные условия при одновременной их реализации.

*Структура статьи.* В следующем пункте кратко описана сеть, как объект исследования. Затем описаны составные части показателя качества, а также способы выбора этих показателей и сервисов для сравнения. В пункте “Метод сравнения двух и более показателей качества” дано детальное описание метода сравнения сервисов как однородных, так и неоднородных. Далее приводится пример сравнения сервисов по описанному методу, в завершении формализованы основные научные и практические результаты.

**Постановка задачи и описание объекта исследования.** Дана сеть Net. Основным функциональной единицей работы в сети являются сервисы, которые она поддерживает  $S = \{s_i\}, i = 1..m$ . В сети активны некоторое количество пользователей  $U = \{u_k\}, k = 1..l$ . Пользователи запрашивают сеть на предмет предоставления сервиса определенного типа. При удовлетворении запроса пользователя в обслуживании сеть создает экземпляр сервиса для работы  $s_i$ . Показателем удобства работы пользователей в сети является качество этих экземпляров сервисов.

Под показателем качества  $Q(s_i)$  будем понимать множество показателей состояния – численных значений, количественно характеризующих состояние сервиса. Каждый сервис характеризуется некоторым показателем качества:  $Q(s_i) = \{q_{i,j}\}$ , где  $q_{i,j}$  – показатель состояния,  $j = 1..n$ ,  $n$  – количество показателей состояния. Таким показателями могут быть пропускная способность, время отклика, цена, надежность и т.д. Множество показателей состояния формируют показатель качества, по которому вычисляется качество некоторого сервиса:  $Q(s_i) \rightarrow QoS(s_i)$ .

Непосредственное вычисление показателя качества некоторого сервиса затруднено из-за разнородности показателей состояния. При сравнении

нескольких сервисов возможно провести нормализацию входящих в QoS параметров и вычислить показатель качества сравниваемых сервисов.

При сравнении сервисов по качеству возникает ряд задач:

- выбора сервисов для сравнения;
- определения набора показателей состояния для сравнения сервисов по качеству;
- нормализации параметров состояния;
- определения численного значения качества сервиса и выбор лучшего показателя качества некоторого сервиса.

Следовательно, рассматриваемая *постановка задачи* сводится к развитию методов оценивания качества сервисов сети и их сравнения при использовании различных показателей состояния этих сервисов.

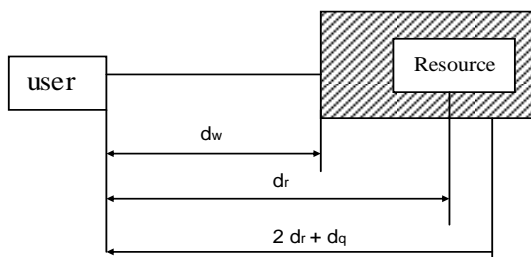
**Показатели состояния сервисов компьютерных сетей, выбор показателей и сервисов.** Сервис, как функциональная характеристика компьютерной сети, может быть представлен множеством показателей. Качество сервиса <Quality> является сложным показателем, который обычно представляется как комплексный интегральный показатель, отражающий различные параметры функционирования сервисов сети. В зависимости от цели проводимого сравнительного или оценочного анализа <Goal> выбираются определенные показатели <Quality> и на основании их формируется критерий.

Предполагается весь набор показателей <Quality> разбить на несколько качественно различных групп: технические, информационные, показатели надежности, функциональные, эргономические, ценовые, юридические. Таким образом, имеем:  $Quality = \langle PT, PI, PR, PF, PE, PC, PJ \rangle$

Конкретные значения, соответствующие рассмотренным группам показателей определяют состояние сервиса, а сами показатели являются показателями состояния.

К техническим показателям <PT> относятся <задержка>, <потери>, <отказы>, <ошибки>, <пропускная способность>. При этом каждый из показателей оценивается по определенной методике и является множественным. Например, для системы “клиент-сервер (веб)” для сравнения имеющихся в сети сервисов удаленного хранения/передачи файлов задержка рассматривается как задержка доставки сообщений до станции, содержащей ресурс  $d_w$ ; задержка доступа к ресурсу  $d_r$ ; задержка реализации запроса и возврат результата  $2 d_r + d_q$  (см. рисунок).

К информационным <PI> относятся <информационная скорость>, <типы обмениваемых структур (сообщение, файл, поток)>, <поддерживаемые форматы данных>, <размер лимита трафика>.



Задержки при доступе к ресурсу сети.

К функциональным <PF> относятся <поддержка транзакций>, <поддержка безопасной среды передачи данных>, <шифрование трафика>.

К эргономическим <PE> относятся <субъективная оценка удобства>, <статистики оценок удобства>.

К ценовым <PC> относятся <стоимость подключения>, <абонентская плата>, <плата за время>, <плата за трафик>, <плата за превышения лимита трафика>.

К юридическим <PJ> относятся <формы договорных отношений>, <форма оплаты>, <штрафы>.

К показателям надежности <PR> относятся <стабильность характеристик сервисов>, <число отказов>, <общее время работы>, <время простоя за год>.

Среди всех имеющихся сервисов для компьютерных сетей предлагается рассматривать сервисы <Services>, представленные в таблице.

Сервисы корпоративной сети

Сервис	Тип сервиса
$s_1$	FTP
$s_2$	Web
$s_3$	File-service
$s_4$	TV stream
$s_5$	ICQ
$s_6$	Videoconference
$s_7$	Multimedia

Результаты сравнения сервисов зависят от места проведения оценочного измерения Location. Предлагается рассматривать такие варианты: <разные сети>, <разные участки одной сети>, <разные категории пользователей>.

Сравнение сервисов осуществляется в соответствии с некоторой целевой функцией <Goal>. К таким функциям будем относить:

3. Выявление сети, которая обеспечивает наилучшую поддержку сервисов (сравнение нескольких сетей);
4. Определение участков сети, которые ухудшают использование сервисов (сравнение нескольких участков);
5. Нахождение сервиса некоторого типа, лучшего по качеству для конкретного пользователя;
6. Выявление лучшей конфигурации одного и того же сервиса;
7. Определение влияния протоколов и средств передачи на качество предоставляемых сервисов.

Таким образом, оценивание (выбор) сервисов для проведения их сравнения сводится к определению точной цели этого оценивания (Goal), выбору места (топологических либо географических рамок) тестирования (Location), выбору типов сервисов (Services), выбору сравнительного показателя (Quality), т.е.

$$\text{Service\_Estimation} \Leftarrow \langle \text{Goal, Location, Services, Quality} \rangle \quad (1)$$

**Метод сравнения двух и более показателей качества сервиса.** Имеем сеть Net. В сети активны пользователи  $U = \{u_i\}$ . В сети также существуют сервисы  $S = \{s_i\}$  (например SMTP, FTP).

При сравнении сервисов необходимо учитывать принципы однородности:

- по самому сервису, т.е. сервисы одного типа;
- по расположению - различные участки сети для сервиса и потребителей сервиса;
- по среде использования: локальная сеть, корпоративная сеть, Интернет;
- по методам оценивания;
- по приоритетам пользователя (например, при некотором сравнении важна пропускная способность сервиса).

Каждый сервис имеет  $Q(s_i) = \{q_{i,j}\}$  – заявленные показатели качества – качество, которое будет предоставлено пользователю при запросе сервиса,  $j=1..n$ ,  $n$  – количество показателей состояния.

Имеем два случая сравнения сервисов, сравнение однородных и неоднородных сервисов.

**Сравнение однородных сервисов.** Под однородностью сервисов будем понимать их одинаковый тип и функциональную общность. Например, сервисы FTP, или Web сервисы, обеспечивающие поиск по Internet.

В соответствии с (1) осуществляем выбор показателей и сервисов. Произведем вычисление качества сервисов по их показателям. Имеем матрицу:



$$Q = \begin{pmatrix} q_{1,1} & q_{1,2} & \dots & q_{1,n} \\ q_{2,1} & q_{2,2} & \dots & q_{2,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_{m,1} & q_{m,2} & \dots & q_{m,n} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Предполагается, что все численные значения показателей состояния положительны.

Для унификации размерностей показателей состояния нормализуем матрицу.

Для этого введем вектор:  $G = \{g_j\}, j=1..n, g_j = \begin{cases} 1 \\ -1 \end{cases}$ , где  $g_j = 1$  – если численное повышение критерия  $q_{i,j}$  повышает качество,  $g_j = -1$  – если численное повышение показателя  $q_{i,j}$  понижает качество.

Для различных ролей имеет место различные значения  $g_j$ . Например, для пользователя  $u_i$  увеличение стоимости – уменьшает показатель качества сервиса, а для владельца повышение цены – улучшает сервис.

Длина вектора  $G$  – количество критериев в  $Q(s_i)$ .

Нормализованная матрица (3) получается при преобразовании (4):

$$Q' = \begin{pmatrix} q'_{1,1} & q'_{1,2} & \dots & q'_{1,n} \\ q'_{2,1} & q'_{2,2} & \dots & q'_{2,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ q'_{m,1} & q'_{m,2} & \dots & q'_{m,n} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$q'_{i,j} = \begin{cases} \frac{q_{i,j}}{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m q_{i,j}}, & \text{if } (g_j) = 1 \\ \frac{q_{i,j}}{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m q_{i,j}}, & \text{if } (g_j) = -1 \end{cases}, \quad (4)$$

где  $q'_{i,j}$  - отклонение показателя состояния сервиса от среднего значения для  $j$ -того показателя по всем сервисам.

Вводим вектор весов  $W = \{w_j\}, j=1..n$ ,  $w_j$  – вес  $j$ -того показателя состояния, определяет относительную важность показателя в соответствии с (1). Если  $w_j = 0$  – значит  $j$ -тым критерием можно пренебречь.

Определение вектора весов осуществляется путем экспертного оценивания. Выбор каждого весового показателя  $w_j$  основывается на чувствительности показателя качества и QoS к изменению данного показателя  $q_{i,j}$ . Например, для сервиса IP телефонии наиболее критичным является параметр задержки пакетов. Поэтому для IP телефонии весовой показатель для задержек должен быть значительно больше остальных технических показателей. Для различных типов сервисов технические весовые коэффициенты будут различными. Коэффициенты для других групп пользователей, руководствуясь целью сравнения.

Векторы весов отличаются для каждой роли и для каждого пользователя. Например, некоторому пользователю  $u_i$  критически важна стоимость и не важна скорость работы, для администратора  $Adm_{net}$  важна минимизация потребляемых ресурсов для стабильной работы сети, для владельцев  $Own_{net}$ ,  $Own_s$  наиболее важна цена сервисов. Таким образом вектор  $W$  формализует приоритеты пользователя, производящего сравнение.

Тогда качеством сервиса для сервиса  $s_i$  будет:

$$QoS(s_i) = \sum_{j=1}^n q'_{i,j} * w_j \quad (5)$$

Получаем множество численных значений  $QoS(s_i)$ , каждый из которых соответствует показателю качества для сервиса  $s_i$ .

Чем больше численное значение  $QoS(s_i)$  – тем лучше качество сервиса, т.е.:  $QoS_e(S) = QoS(Q(s_1), Q(s_2), \dots, Q(s_n)) = \max(QoS(s_i))$ , где  $QoS_e(S)$  – лучший сервис из множества сравниваемых сервисов по качеству.

**Сравнение неоднородных сервисов.** Задача сравнения неоднородных сервисов возникает при оценивании совокупного вклада сервиса в решение каких-либо общих задач, например, оценивании стоимостных затрат на поддержку какого-либо сервиса, оценивании целесообразности поддержки и сопровождения какого-либо сервиса, оценивании эффективности использования какого-либо сервиса для решения конечной задачи, сравнение сервисов с точки зрения полезности для конечных пользователей и с точки зрения эффективной нагрузки на сеть.

В этом случае предлагается прежде всего выбрать объект для которого проводится оценка. Например, для сети, для домена, для пользователя или группы пользователей. Далее выбираются показатели важные для этих объектов. По этим показателям сравниваются сервисы.

Например, решается задача оценивания целесообразности поддержки нескольких сервисов. Тогда выбираем стоимостные показатели, как наиболее

важные для объекта (сети) и проводим сравнительный анализ в соответствии с первым методом.

Для характеристик неоднородных сервисов можно ввести несколько дополнительных оценок: *предпочтительность*, *результативность*, *эффективность* (*Preferability*, *consequence*, *efficiency*). Предпочтительность  $\eta(s_j, u_i)$  – оценка, характеризующая степень предпочтения определенного сервиса  $s_j$  перед другими для пользователя  $u_i$ . Результативность – оценка, характеризующая конечный эффект от использования сервиса, Эффективность  $\epsilon(s_j, u_i)$  – оценка отражает степень производительности сервиса. Предпочтительность, результативность и эффективность могут быть вынесены в качестве показателей состояния.

**Пример использования метода сравнения сервисов.** Пользователю и необходимо отыскать лучший сервис IP телефонии для работы с ним. При этом он сравнивает несколько сервисов типа <IP телефония> для нахождения лучшего по качеству.

Выберем показатели состояния сервиса согласно цели сравнения. Руководствуясь экспертным оцениванием, а также тем фактом, что цена подобных сервисов является приблизительно одинаковой, примем  $Q\{s_i\} = \{td, d\}$ , где  $th$  – скорость передачи данных,  $d$  – задержка (временной интервал от отправления данных до их получения).

Имеются два заявленных организациями показателя качества для сервисов IP телефонии для уровня Silver:

$$Q(s_1) = \{180\text{kbps}, 110\text{ms}\}; Q(s_2) = \{130\text{kbps}, 130\text{ms}\}.$$

Необходимо выбрать лучший сервис по качеству. Согласно входным данным имеем матрицу:

$$Q = \begin{Bmatrix} 180 & 110 \\ 130 & 130 \end{Bmatrix}$$

Вводим вектор влияния показателей состояния на качество предоставляемого сервиса  $G = \{1, -1\}$ .

Определим вектор весов. При этом необходимо учитывать значительное влияние задержек на качество сервиса IP телефонии, по сравнению с другими выбранными показателями состояния. Вектор весов определим путем экспертного оценивания как  $W = \{1, 5\}$ .

Используем преобразование (4) для получения нормализованной матрицы:

$$Q' = \begin{Bmatrix} 1,161 & 1,09 \\ 0,839 & 0,923 \end{Bmatrix}$$

В итоге получаем численные значения показателей качества по (5):

$$QoS(s_i) = \{QoS(s_1), QoS(s_2)\} = \{2,251; 1,1762\}$$

Лучшим является первый сервис, так как  $QoS(s_1) > QoS(s_2)$ . Таким образом, пользователь определил лучший сервис и начал работу с ним.

**Выводы.** В работе выделен ряд нерешенных задач, связанных с проблемой сравнения сервисов по качеству. Выполнено дальнейшее развитие метода оценивания сервисов и их сравнения, формализован показатель качества как множество показателей состояния.

*Научная новизна* состоит в том что: получил дальнейшее развитие метод сравнения сервисов сети по их качеству. Предложен путь выбора сервисов и их параметров для сравнения. Предложен перечень сравниваемых сервисов сети. Осуществлено разделение параметров на функциональные группы. Описано сравнение однородных и неоднородных сервисов.

*Практическая значимость* состоит в том, что полученный метод сравнения можно использовать для нахождения участков сети, ухудшающих качество сервиса, поиску оптимального сервиса для данного пользователя в методах управления сетью для оптимизации распределения ресурсов. Это в свою очередь способствует снижению затрат на поддержку, конфигурирование и переконфигурирование сети.

*Сравнение с лучшими аналогами.* Данную работу можно рассматривать как дальнейшее развитие идей, высказанных в [1], позволяющих вычислить качество некоторого сервиса. Область метода расширена способом определения параметров и сервисов для сравнения. При этом появляется возможность сравнивать любые сервисы путем введения дополнительных параметров. Результаты могут быть использованы вместе с методами [3] для контроля предоставляемого качества.

*Направления дальнейших исследований.* Планируется использовать результаты, полученные в данной работе в исследованиях проблем непрерывного мониторинга, а также управления сетью при помощи политик менеджмента.

**Список литературы:** 1. Yutu Liu, Anne H.H. Ngu, Liangzhao Zeng QoS Computation and Policing in Dynamic Web Server Selection // WWW.– 2004.– Май.– С.66-73. 2. Shiping Chen, Paul Greenfield QoS Evaluation of JMS: An Empirical Approach // Proceedings of the 37th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'04).– 2004.– Т.9.– С. 276-282. 3. Chen Lee, Lehoetzky J., Rajkumar R., Siewiorek D. On quality of service optimization with discrete QoS options // Real Time Technology and Applications Symposium.– Vancouver.– 1999.– С.276-286. 4. Mehdi Amirijoo, Jergen Hansson, Sang Hyuk Son Specification and Management of QoS // Real-Time Databases Supporting Imprecise Computations. IEEE Trans.– 2006.– С.304-319.

*Поступила в редколлегию 15.05.05*

***В. А. КОЛБАСИН***

## **УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ МЕТОД РАСПОЗНАВАНИЯ СИГНАЛОВ НАБОРА НОМЕРА В ТОНАЛЬНОМ РЕЖИМЕ**

У статті розглянутий удосконалений метод розпізнавання сигналів набору номера у тональному режимі, стійкий до наявності полігармонійної перешкоди. При малому рівні перешкоди метод припускає уточнення параметрів сигнальних компонентів (СК), а при великому рівні – посилення вимог до параметрів СК. Запропоновано метод якісного визначення рівня перешкоди по даним декількох підряд, що йдуть вікон, аналізу. Наведено структурну схему декодера, побудованого на основі запропонованого підходу.

В статье рассмотрен усовершенствованный метод распознавания сигналов набора номера в тональном режиме, устойчивый к наличию полигармонической помехи. При малом уровне помехи метод предполагает уточнение параметров сигнальных компонент (СК), а при большом уровне – усиление требований к параметрам СК. Предложен метод качественного определения уровня помехи по данным нескольких подряд идущих окон анализа. Представлена структурная работы декодера, построенного на основе предложенного подхода.

In the article improved DTMF recognition method that robust to polyharmonic interference is proposed. If interference level is low, the signal component (SC) parameters are adjusted, but if interference level is high – SC constraints are strengthened. The method for qualitative interference level estimation on several analysis windows is proposed. Flow diagram of decoder that based on proposed method is presented.

**Введение.** При разработке систем компьютерной телефонии важной является задача распознавания сигналов набора номера в тональном режиме (ННТР). Сигнал ННТР представляет собой сумму двух синусоидальных сигналов (сигнальных компонент, СК), частоты которых  $f_1, f_2$  выбираются из множества допустимых частот  $F$ . Частота  $f_1$  выбирается из набора частот нижней группы 697, 770, 852, 941 Гц, а частота  $f_2$  - из набора частот верхней группы 1209, 1336, 1477, 1633 Гц. Выбор конкретных значений частот  $f_1, f_2$  определяет цифру номера. Параметры сигнала задаются стандартом [1].

В большинстве приложений применяется классическая методика распознавания сигнала, одна из лучших реализаций которой приведена в работе [2]. Согласно ей на анализируемом участке сигнала вычисляются оценки спектральной плотности мощности (СПМ) на всех частотах множества  $F$ . Затем находятся две частоты, на которых были получены максимальные оценки СПМ, и из предположения, что они являются частотами СК, выполняется проверка соответствия параметров сигнала требованиям стандарта. Однако, проверка допустимости отклонения частоты СК от номинала выполняется косвенно, за счет выбора ширины элемента разрешения по частоте при оценивании СПМ, и совместно с проверкой

допустимости отношения мощностей СК (уровня твиста). Поскольку стандарт задает отдельные требования для каждого из вышеперечисленных параметров, при их совместном отклонении от номинальных значений использование значения твиста для определения соответствия сигнала требованиям стандарта будет некорректным и может привести как к ложному определению, так и к ложному пропуску цифры. К тому же, классическая методика не содержит механизмов уменьшения влияния помех, особенно полигармонических. Поскольку значительное отклонение частот СК от номинала и высокий уровень помех характерны для значительной части отечественных телефонных сетей, построение декодера, учитывающего особенности распознавания сигнала ННТР в приведенных выше случаях представляется актуальным.

Таким образом, целью данной работы является построение методики распознавания сигнала ННТР, способной работать при значительном отклонении частот СК от номинала и в присутствии достаточно мощной (в том числе и полигармонической) помехи.

**Идея метода.** Из-за существенных ограничений на объем используемых вычислительных ресурсов распознавание сигналов ННТР при одновременном наличии мощной помехи и существенном отклонении параметров СК от номинала представляется невозможным. Но, при наличии мощной помехи в области частот СК существенно увеличивается вероятность ложного обнаружения цифры и защита декодера от ложных срабатываний становится более важной, чем обеспечение распознавания сигнала, параметры СК которого существенно отличаются от номинала. Поэтому, в зависимости от мощности помехи приоритетным будет либо обеспечение распознавания сигналов ННТР с отклонением частоты от номинала, либо защита декодера от ложных срабатываний. Соответственно, декодер будет работать в одном из трех режимов:

1) если мощность помехи мала, то используется методика [3] оценки отклонения частоты СК от номинала и коррекции оценки СПМ СК по двум оценкам СПМ, вычисленным при различной ширине элемента разрешения по частоте (бина);

2) если мощность помехи средняя, то оценки параметров СК рассматриваются «как есть», без коррекции.

3) если мощность помехи велика, то выполняется уточнение оценок СПМ на частотах предполагаемых СК с меньшей шириной бина. Оценки СПМ на частотах, не являющихся частотами СК при этом не уточняются, чтобы искусственно не уменьшать соотношение сигнал/шум в диапазоне частот СК.

Для реализации данного подхода необходимо качественно оценить мощность помехи и отнести ее к одному из трех описанных выше классов.

Поскольку речевая помеха и сигнал ННТР занимают одну и ту же полосу частот, и разрешения по частоте обычно не хватает для разделения гармоник сигнала и помехи, достоверно оценка мощности помехи по данным одного

окна анализа в общем случае будет не достаточно надежной. С достаточной долей уверенности о наличии помехи может говорить лишь резкое уменьшение оценки мощности СК при уменьшении ширины бина.

Для оценки уровня помехи можно воспользоваться тем фактом, что энергия речевой помехи и сигнала ННТР по разному изменяется с течением времени. Энергия речевого сигнала изменяется плавно, без явно выраженных фронтов. Для сигнала ННТР, напротив, характерно резкое изменение энергии сигнала в моменты начала и завершения тональной посылки. Тогда по отношению оценок энергии сигнала, сосредоточенной в полосе ННТР, в двух последовательных окнах можно будет приблизительно определить уровень и тип помехи. Оценку энергии сигнала, сосредоточенной в области частот ННТР, предлагается находить как сумму оценок СПМ на частотах СК при ширине бина, достаточной для перекрытия бинов соседних частот на уровне 0,5. При такой ширине бина гармоника помехи будет учтена в оценках СПМ на частотах группы, куда бы она ни попала: либо в тот же бин, что и СК, либо в бин другой частоты.

**Выбор длин окон анализа.** При выборе длины окна анализа необходимо удовлетворить двум противоречивым требованиям. С одной стороны длина окна анализа должна обеспечивать ширину бина близкую к 7% от номинальной частоты СК. А с другой стороны для надежного распознавания сигнала ННТР необходимо чтобы как минимум два подряд идущих окна анализа были заполнены сигналом ННТР минимальной длины (40 мс) целиком при любом взаимном расположении окон анализа на сигнале. Поскольку сигнал ННТР как правило непрерывен, удовлетворить этим требованиям можно, взяв шаг смещения окна анализа меньшим его длины. Чтобы перекрывающиеся участки сигнала при этом не обрабатывались несколько раз в составе разных окон можно использовать предложенную в [4] методику. Согласно ей сигнал анализируется блоками, равными шагу смещения окна (подокнами) а затем по результатам обработки нескольких подокон вычисляется оценка СПМ по окну анализа, состоящему из этих подокон. Шаг смещения окна анализа (размер подокна) в данной работе принят равным 6,6 мс (53 отсчета). Длины окон анализа, используемых для вычисления оценок СПМ, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Длины окон анализа, используемых для вычисления оценок СПМ

Группы частот	Нижняя	Верхняя
Определение типа шума	106 (2)	53 (1)
Режим декодирования 1, ширина бина 1	159 (3)	80 (1,5)
Режим декодирования 1, ширина бина 2	185 (3,5)	106 (2,5)
Режим декодирования 2	265 (5)	159 (3)
Оценка мощности вторых гармоник	106 (2)	53 (1)

**Определение типа помехи.** Поскольку шаг перемещения окна анализа был выбран меньше длины окна, то одни и те же участки сигнала будут входить в состав нескольких окон анализа. Понятно, что в этом случае для определения типа помехи необходимо сравнивать оценки энергии сигнала в полосе частот ННТР в наиболее близко расположенных окнах, не содержащих общих участков сигнала. Для выбранного шага смещения окна анализа оценки энергии сигнала надо сравнивать между  $i$ -м и  $i-2, i-3$  окнами размером 106 отсчетов. Для частот верхней группы сравнивать надо усредненные данные по двум окнам размером в 53 отсчета.

Таким образом, для определения типа помехи в полосе частот нижней или верхней групп будут использоваться следующие условия:

$$\sum_{j=1,4} (S_{i-2,j} + S_{i-3,j}) > L_{strong} \cdot \max_{j=1,4} S_{i,j} \quad (1)$$

$$\sum_{j=1,4} (S_{i-2,j} + S_{i-3,j}) > L_{small} \cdot \max_{j=1,4} S_{i,j} \quad (2)$$

где  $L_{strong}, L_{small}$  - коэффициенты, определяющие соотношение оценок энергий. Если выполняется (1), то помеха считается мощной, а если выполняется (2) – помеха считается слабой.

**Уменьшение числа ложных пропусков цифры.** В силу близкого расположения частот СК верхней группы и вторых гармоник частот нижней группы возможна ситуация, когда оценка СПМ на частоте второй гармоники существенно увеличивается за счет энергии СК из верхней группы частот. Поскольку большой уровень мощности второй гармоники трактуется как признак наличия в окне анализа речевого сигнала, в этом случае может произойти ложный пропуск цифры. Откорректировать оценки СПМ на частотах вторых гармоник можно в соответствии со следующим выражением:

$$S(2 \cdot f_i) = S'(2 \cdot f_i) - S(f_h) \frac{\sin(\pi \cdot (2 \cdot f_i - f_h) \cdot N / f_{smp})}{\pi \cdot (2 \cdot f_i - f_h) \cdot N / f_{smp}} \quad (3)$$

где  $S'(f)$  – первоначальное значение оценки СПМ;

$S(f)$  – скорректированное значение оценки СПМ;

$N$  – длина окна анализа при вычислении оценки СПМ на частотах вторых гармоник.

Если декодер работает в первом режиме, то используются откорректированные значения  $f_h$  и  $S(f_h)$ . Так как величина отклонения частоты СК от номинала находится по модулю, то  $f_h$  находится из предположения о максимальном воздействии гармоники СК верхней группы



на оценку СПМ на второй гармонике нижней группы. Если же декодер работает во втором режиме, коррекция (3) не выполняется.

Поскольку проверка величины мощности второй гармоники выполняется только для гармоник СК, коррекция (3) выполняется, только если вторая гармоника СК нижней группы расположена близко от СК верхней группы.

**Схема работы декодера.** Для удобства дальнейшего рассмотрения разделим процесс распознавания на три этапа. На первом этапе принятый сигнал разбивается на окна анализа и для каждого окна вычисляются оценки параметров СК и оценивается тип помехи. На втором этапе – принимается решение о том, присутствует ли на анализируемом окне сигнал ННТР, и при принятии положительного решения выполняется декодирование сигнала. На третьем этапе выполняется анализ результатов распознавания нескольких подряд идущих окон анализа для проверки выполнения требований стандарта по длительности сигнала. Здесь же принимается окончательное решение о декодировании сигнала ННТР.

Схема работы первого этапа для одной группы частот показана на рис. 1.

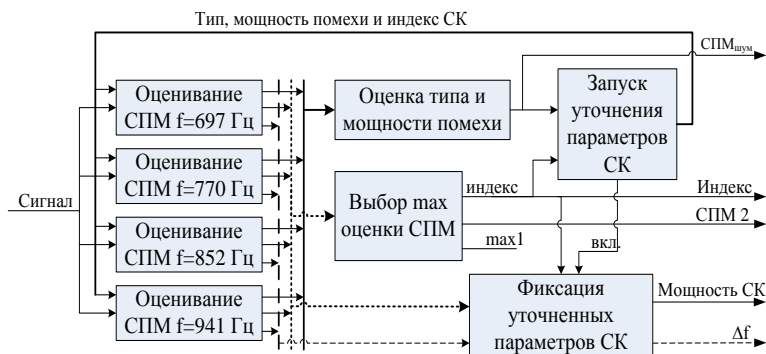


Рис. 1. Структурная схема первого этапа распознавания для нижней группы частот.

Блоки оценивания СПМ выполняют разбиение сигнала на окна и после обработки каждого подокна вычисляют оценки СПМ для нахождения типа помехи и предварительные оценки параметров СК. Далее, в зависимости от типа помехи, на соответствующий блок оценивания СПМ может быть выдан управляющий сигнал коррекции параметров СК. Результаты коррекции фиксируются в одноименном блоке и выдаются на блок решающего правила. Туда же передается оценка второй по мощности оценки СПМ в группе.

Структурная схема блока оценивания СПМ представлена на рис. 2.

Поступающий на вход блока оценивания СПМ сигнал разбивается на подокна длиной 53 отсчета и обрабатывается фильтром Герццеля [5]. Состояние фильтра Герццеля после завершения обработки подокна записывается в сдвиговой буфер (ЛЗ). Далее, на их основе находятся оценки СПМ с различной шириной бина по методике [4]. При поступлении сигнала

уточнения оценок параметров СК при наличии мощной помехи вычисляется оценка СПМ по окну длиной 265 отсчетов (блок с штрихованной рамкой). Отклонение частоты СК от номинала в этом случае принимается равным нулю. Если же поступает сигнал о наличии слабой помехи, то вычисляется оценка СПМ по окну длиной 186 отсчетов и находится оценка отклонения частоты СК от номинала и уточненное значение мощности СК [3] (блоки с штрихпунктирной рамкой). На выход блока подается уточненное значение оценки мощности СК. Для блока оценки СПМ на частоте верхней группы структура останется такой же, а измениться лишь количество подокон при вычислении оценок СПМ.

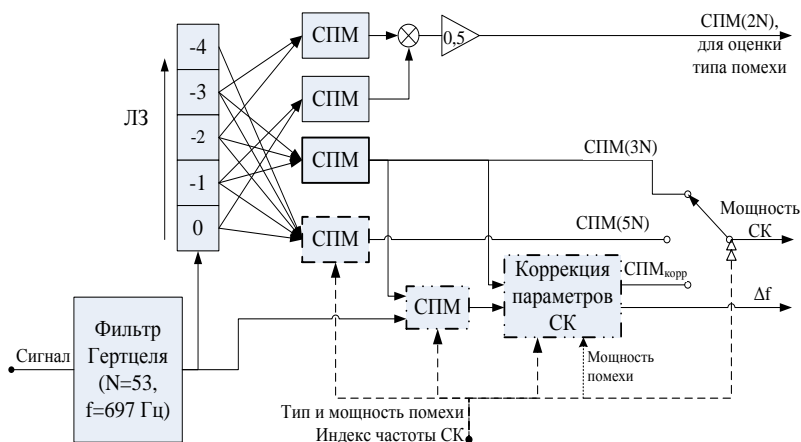


Рис. 2. Структура блока оценивания СПМ.

Работа решающего правила на втором этапе распознавания сводится к проверке, удовлетворяет ли анализируемый сигнал требованиям стандарта. Для этого выполняется стандартный набор проверок, описанный в частности в [2], и при выполнении коррекции параметров СК – выполняется проверка допустимости оценки отклонения частоты  $\Delta f$  от номинала. Если все условия выполняются, то принимается решение о том, что данное окно содержит сигнал ННТР и выполняется его декодирование.

На третьем этапе по результатам распознавания сигнала в нескольких окнах анализа выполняется проверка на допустимость длительности сигнала ННТР. При этом учитывается допустимость паузы длительностью до 10 мс, для чего допускается отсутствие распознавания цифры в двух подряд идущих окнах анализа на протяжении всего сигнала ННТР.

При определенном взаимном расположении окон анализа и сигнала ННТР, длительностью меньше допустимой, простой подсчет количества окон, в которых была обнаружена цифра, может дать неправильный

результат. При этом крайние окна будут заполнены сигналом лишь частично, и оценки СПМ СК в них будут пропорционально степени заполнения меньше, чем в центральных окнах. Для исключения подобной ситуации одно из окон анализа, в которых оценки СПМ СК изменяются, не рассматривается.

По результатам обработки каждого окна анализа генерируются пять логических значений:

8. *valid* - истинно, если в окне анализа был обнаружен сигнал ННТР;
9. *same* - истинно, если декодированный символ не изменился;
10. *down* - истинно, если в текущем окне мощность СК составляет больше 25%, но меньше 75 % мощности в предыдущем окне;
11. *len* - истинно, если мощность СК изменилась не более чем на 20 %.

Эти логические значения подаются на вход двум параллельно работающим конечным автоматам (КА). Первый автомат проверяет выполнение временных требований стандарта, а второй – проверяет, не изменилась ли цифра в соседних окнах. Графы переходов данных конечных автоматов (КА) представлены на рис. 3.

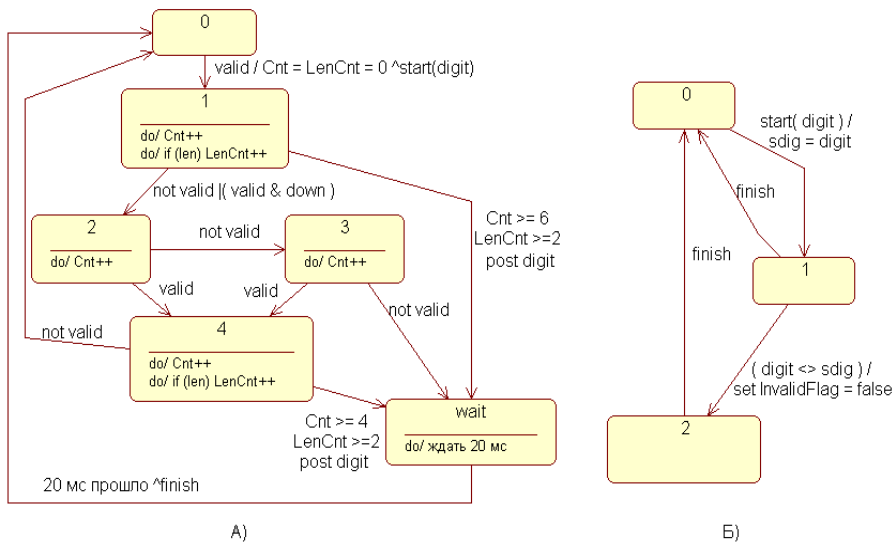


Рис. 3. Граф переходов КА, проверяющих выполнение временных требований стандарта (А) и постоянство определенной цифры (Б).

При обнаружении в текущем окне сигнала ННТР первый КА переходит в состояние 1 и выдает событие *start* на второй КА. В состоянии 1 КА подсчитывает количество одинарных и двойных окон, в которых сигнал ННТР был обнаружен. Первое значение накапливается в переменной *Cnt*, а второе – в *LenCnt*. При пропадании сигнала после его успешного

обнаружения, КА переходит поочередно в состояния 2 и 3. При появлении сигнала вновь, КА переходит в состояние 4, а при отсутствии сигнала более 2-х окон подряд – в состояние завершения обработки символа *wait*. После того, как более чем в 3-х окнах подряд сигнал не будет обнаружен, КА переходит в начальное состояние, генерируя при этом событие *finish*.

Второй КА отслеживает, изменяется ли распознаваемая цифра в соседних окнах. Если цифра изменилась, то это говорит о том, что ее появление вызвано помехой, а сама цифра должна считаться недействительной. По приходу события *start* цифра запоминается и КА переходит в состояние 1. Если в следующих окнах будет обнаружена другая цифра, выставляется флаг недействительности цифры, и КА переходит в состояние 2, где и остается до завершения приема цифры.

Если при генерации события *finish* второй КА находится в состоянии 1 – считается, что цифра распознана верно.

**Результаты.** Чтобы оценить качество распознавания сигналов ННТР при отклонении параметров СК от номинала с использованием методов [2, 6] и предложенного метода были построены усредненные зависимости количества верных и ложных распознаваний цифры от мощности белого шума. Для каждого значения мощности брались 200 реализаций шума, и для каждой из них подсчитывалось количество верных и ложных распознаваний всех возможных цифр при отклонении частоты и мощности каждой СК от номинала в пределах  $-5\%$  –  $+5\%$  и  $-10$  dB –  $+6$  dB соответственно. График данной зависимости представлен на рис. 4.

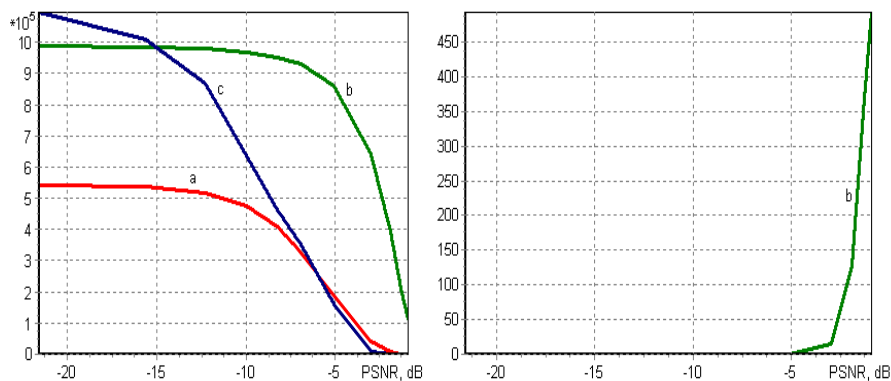


Рис. 4. Зависимость факта верного (слева) и ложного (справа) распознавания цифры от уровня шума. (а – метод [2]; б – метод [6]; с – предложенный метод).

Как можно заметить, предложенный метод обеспечивает самое большое количество верно распознанных цифр при малом уровне шума. При росте уровня помехи количество распознаваний снижается и достигает уровня

метода [2]. При этом на данном тесте предложенный метод не продемонстрировал ложных срабатываний.

Также, для проверки работоспособности методы в реальных условиях были проведены тесты talk-off, которые используются для определения частоты ложных срабатываний декодера на часто встречающихся в ТфОП сигналах – речи, музыке и т.п. По причине отсутствия у автора тестовых кассет, на которых записаны стандартные тесты Bellcore, по такому же принципу были созданы тестовые записи продолжительностью по 2 часа. Результат распознавания декодером данных тестовых записей приведен в таблице 2.

Таблица 2. Результаты talk-off тестов.

Тип тестового сигнала	Количество ложно определенных цифр за 2 часа		
	Метод [2]	Метод [6]	Предложенный метод
Музыка	1595	159	77
Речь	383	17	18

Таким образом, предложенный метод позволяет существенно улучшить качество распознавания сигнала ННТР в случаях значительных отклонений параметров СК от номинала и при наличии полигармонической помехи при сравнительно малых дополнительных затратах ресурсов и может быть использован при построении систем компьютерной телефонии, ориентированных на использование в отечественной телефонной сети.

Список литературы: 1. International Telecommunication Union, ITU-T Recommendation Q.24, Multifrequency push-button signal detection, Fascicle VI.1, Blue Book, 1993. 2. Felder M., Mason J., Evals B., "Efficient dual-tone multi-frequency detection using the non-uniform discrete Fourier transform", IEEE Signal Processing Letters, vol. 5, pp.160-163, July 1998. 3. Колбасин В.А. Оценка отклонения от номинала частот двухтонального сигнала набора номера. Вестник НТУ "ХПИ". – 2005. - №59. – "Системный анализ, управление и информационные технологии". С 75-78. 4. Куценко А.С., Колбасин В.А. Модифицированный алгоритм вычисления спектральной плотности мощности для задачи распознавания двухтональных сигналов // Хмельницький: Вісник Технологічного університету Поділля, 2003. – № 4, ч. 2. – с. 217 - 220. 5. Goertzel G. An Algorithm for the Evaluation of Finite Trigonometric Series // American Math Monthly, 1958, Vol.65, pp 34-35. 6. Analog Devices, DSP Applications using the ADSP-2100 Family. Prentice-Hall, 1992.

Поступила в редколлегию 23.05.07

**Н.П. ГРИНЧЕНКО**, канд. техн. наук,  
**Г.В. ЕФРЕМОВА**, студентка НТУ «ХПИ»

## ЭФФЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЕМ

В статті розглянуто стан основних ефективних систем управління підприємствами та сучасну концепцію менеджменту якості. Визначено проблеми впровадження системи менеджменту якості «TQM» на українських підприємствах, а також запропоновано послідовність дій для успішного використання даної методології.

В статье рассматривается состояние основных эффективных систем управления предприятиями и современная концепция менеджмента качества. Определяются проблемы внедрения системы менеджмента качества «TQM» на украинских предприятиях, а также предложена последовательность действий для успешного использования данной методологии.

The article deals with the conditions of main efficient enterprise management systems and modern conception of quality management. The problems of introduction of quality management system «TQM» on the Ukrainian enterprises are determined, and also for the successful use of this methodology the sequence of activities is offered.

**Введение.** Очевидно, что будущее место Украины в числе лидеров мирового сообщества. Для этого имеются все предпосылки – уникальное географическое положение, благоприятные климатические условия, наличие ресурсов, высокий интеллектуальный потенциал нации.

Однако, наряду с этим, существует целый ряд причин, которые могут выбросить Украину на обочину мирового прогресса. Среди них, прежде всего, объективная закономерность, установленная нобелевским лауреатом Майклом Портером: «На благосостояние страны очень слабое влияние оказывает наличие благоприятных факторов, таких как, хорошие климатические условия, большие размеры территории, достаточный объем ископаемых и другие природные особенности» [1]. Отсутствие же благоприятных условий, наоборот, стимулируют нацию к борьбе за благосостояние. Примерами достижения успеха в такой борьбе служат Япония, страны Скандинавии, страны Балтики, Англия, Голландия, а теперь и Китай. С другой стороны – экваториальные страны с плодородными землями и богатыми запасами природных ресурсов, к числу которых и принадлежит Украина.

Действительно, по оценке Всемирного экономического форума, рейтинги стран мирового сообщества по фактической конкурентоспособности были следующими [2]: Финляндия – 1, США – 2, Швеция – 3, Дания – 5, Норвегия – 6, Япония – 8, Исландия – 9, Великобритания – 10, Германия – 13, Франция – 27 и т. д. Украина занимала 86<sup>10</sup> позицию (в 2003 г. – 84<sup>10</sup>) в окружении таких стран: Кения – 78, Уганда – 79, Замбия – 83, Мали – 88, Эквадор – 90, Нигерия - 93 – более чем достойная компания.

Критерии рейтинга учитывали: уровень развития экономики, образование, науки, правовой системы, информатики, финансов, налоговой системы, внешнеэкономической деятельности, системы управления, социальных вопросов и т. п. Как следует из перечня критериев, перед Украиной стоит сложная, но вполне решаемая задача преодоления субъективных и объективных факторов, негативно влияющих на ее процветание и, прежде всего, необходимо приложить максимум усилий для поднятия уровня развития экономики, в частности, предложить компаниям на мировом рынке конкурентоспособный товар с мировым уровнем качества, обоснованной и принятой рынком ценой, высоким уровнем сервиса при его реализации, товара с оптимальными затратами у потребителя при его эксплуатации и, безусловно, системным, комплексным управлением всеми этими составляющими товара. К счастью, в мировой практике управление объектами существуют методы и алгоритмы решения данной проблемы [2].

Методология решения этих проблем напрямую связана с обеспечением качества всей деятельности предприятия: качества проектирования продукции и процессов ее создания, качества оборудования, качества производства и реализации товаров и услуг, качества труда, качества взаимоотношений сотрудников и т. п.

**Современное состояние основных эффективных систем управления предприятиями.** На то, что успех в конкурентной борьбе надо искать в качестве еще задолго до «японского чуда» в далеком 1928 году обратил внимание наш соотечественник И.П. Ильин. [3] В статье «Спасение в качестве» он писал «Россия (подразумевай Украина) восстанет из распада и унижения и начнет эпоху расцвета и нового величия. Но возродится она и расцветет лишь после того, как русские люди поймут, что спасение надо искать в качестве!» Однако, исторически так сложилось, что первыми это поняли японские предприниматели. После Второй Мировой войны, когда промышленный потенциал большинства стран Европы и Азии был уничтожен, США начали в неограниченном количестве производить различную бытовую технику. Но уже в 70-х – 80-х годах американский бизнес столкнулся с жесточайшей конкуренцией по качеству товара со стороны, в основном, японских фирм.

Но использовать японский опыт по управлению качеством компании США не могли по двум причинам. Во-первых – это трудоемкость и длительность процесса внедрения управлением качества японской модели, а во-вторых – опасность в процессе перестройки отстать от лидеров на десятилетия. Поэтому компании США для улучшения качества продукции и повышения производительности труда применили методологию стратегического менеджмента [1]. Задействовав свой огромный промышленный и финансовый потенциал, компании США к началу XXI века вошли в группу стран-лидеров мирового производства. Конкурентная борьба ведущих компаний мира подтверждают тезис, что XXI век – век качества и

качество важнее цены, а управление предприятием – это фактически управление качеством.

Итак, в настоящее время в конкурентной борьбе фирмы используют в основном три методологии управления бизнес-процессами: менеджмент на основе качества [3]; стратегический менеджмент [1]; менеджмент непрерывного совершенствования – методология «Шесть Сигм» [4]. Особенность модели менеджмента на основе качества, которую разработали японцы, состоит, прежде всего, в том, что абсолютно все изготовители продукции или оказывающие услуги граждане Японии осознанно, искренне, исключительно уважительно относятся к потребителям и заказчикам. Имеет место своего рода культ потребителя, как во внутрифирменных, так и при межфирменных отношениях. В этом состоит успех «японского качества», опытом которого практически невозможно воспользоваться. Характерной чертой «японского качества» является абсолютное исключение административного давления при производстве и реализации товара.

Стратегический менеджмент, напротив, используя многие элементы системы менеджмента качества, такие как системы стимулирования и поощрения, идеологию корпоративной культуры и многие другие, основан фактически на административном управлении. Стратегическое видение и миссия фирмы формируется непосредственно руководителем фирмы. Он же устанавливает стратегические и финансовые цели, сам формулирует стратегию достижения поставленных целей или утверждает и отвечает за выполнение предложенной сотрудниками стратегии.

Воспользовавшись методологией стратегического менеджмента и элементами таких методов как «TQC» (Всеобщего управления качеством) и «TQM» (Всеобщего менеджмента качества), американские корпорации к началу XXI века стали на равных конкурировать с японскими и западноевропейскими фирмами не только по цене, но и по качеству.

Но американцы не остановились на достигнутом. В недрах ведущих корпораций США (в частности «GE», «Motorola» и др.) в конце XX века сформировалась методология управления непрерывным совершенствованием бизнес-деятельности – система «Шесть Сигм» [4, 5]. Система «Шесть Сигм» впитала в себя элементы стратегического менеджмента, такие как формирование миссии, целей и стратегии фирмы, разработку системы поощрений и развитие корпоративной культуры; а также выдающиеся достижения «TQM», такие как участие в совершенствовании бизнес-деятельности всех без исключения сотрудников организации и, прежде всего, ее руководителей, использование статистических методов контроля функционирования бизнес-процессов, организация работы по групповому принципу, участие в государственных и международных конкурсах.

Успешное применение методологии «Шести Сигм» опирается на следующие принципы: абсолютная ориентация на запросы потребителя; проектный и процессный методы организации непрерывного



совершенствования бизнес-деятельности; уникальный способ контроля уровня непрерывных успехов в достижении поставленных целей; возможность применения системы не только в масштабах всей организации, но и в отдельных ее структурных подразделениях; возможность эффективного применения системы «Шесть Сигм» не только в производственной сфере деятельности, но и в сервисных процессах обслуживания. Алгоритм использования методики «Шесть Сигм» подробно описан в монографиях [4, 5]. В данной работе обсуждаются проблемы использования в практике работы украинских предприятий менеджмента качества на основе «TQM».

**Современная концепция менеджмента качества.** Менеджмент качества – это деятельность по руководству и управлению организацией, относящаяся к качеству. Наряду с такими понятиями как метрология, стандартизация и другими, менеджмент качества оперирует следующими основными понятиями. Качество – это совокупность характеристик объекта, относящихся к его способности удовлетворять установленные и предполагаемые потребности клиентов. Управление качеством – это часть менеджмента качества, связанная с удовлетворением требований к качеству, это взаимосвязь между достигнутыми результатами и затраченными ресурсами, это методы и виды деятельности оперативного характера, используемые для выполнения требований к качеству продукции или процессам. Система управления качеством – это совокупность организационной структуры, методик, процессов и ресурсов, необходимых для осуществления управления качеством, это система документации, в которой установлены общие принципы обеспечения качества.

В целом, управление качеством продукции базируется на следующей триаде: планирование – обеспечение – контроль качества. При планировании качества учитываются затраты и выгоды при реализации плана и устанавливаются целевые уровни показателей качества. Обеспечение качества, в свою очередь, включает технологические процессы, а также регулярную проверку хода процессов.

Что касается контроля качества, то он может быть таких видов как: инспекционный, операционный и самоконтроль. Современная интегрированная концепция качества называется всеобщим менеджментом качества «TQM». «TQM» рассматривает качество как результат мероприятий и операций, охватывающих технологический процесс, экономическую и социальную сферу. «TQM» направлен на улучшение производственных процессов, анализ производственной ситуации в организации. Модель управления качеством «TQM» опирается на такие принципы как: огромная роль руководителя предприятия; ориентация на клиентов; стратегическое планирование; подготовка и стимулирование персонала; применение процессного управления; постоянное улучшение и оценка эффективности работы.

Разработку и внедрение «TQM» рекомендуется поручать специализированным фирмам, действующим по контракту, которые создают «Программу качества» и «Руководство по реализации». С целью управления качеством на предприятии создается служба менеджмента качества, которая координирует, инспектирует и обеспечивает информацией деятельность всех подразделений организации.

**Проблемы внедрения модели управления качеством «TQM» на украинских предприятиях.** Несмотря на успешное применение «TQM» на многих зарубежных фирмах, на украинских предприятиях, к сожалению, воспользоваться методологией «TQM» весьма проблемно. Авторы учебника «Управление качеством» [3] отмечают четыре проблемы.

Первая проблема – методологическая. Она заключается в том, что уровень корпоративной культуры и производства большинства украинских предприятий не позволяет применить основной принцип ISO 9000: «Документируй то, что делаешь и делай то, что задокументировано». Документация текущего уровня производства – это консервация отсталой техники и технологий. Отсутствие же документов, описывающих производство, не позволяет осуществлять аудит качества, т. е. на украинских предприятиях необходимо сначала вывести производственный процесс на мировой уровень, затем задокументировать и лишь потом начать работать по принципу ISO 9000. Вторая проблема – это невыполнение на украинских предприятиях правила Эдварда Деминга: «Низкое качество и низкая производительность вызываются системой управления и на 94% зависят от руководителей предприятия и лишь на 6% от рабочих». На украинских предприятиях ситуация противоположная. Репрессивный менеджмент (поиск и наказание виновников брака) является третьей проблемой. В Украине необходимо переходить от менеджмента, основанного на праве силы, к менеджменту, основанному на силе правил. И четвертая проблема украинских компаний – пропущенные этапы развития менеджмента качества: статистический контроль качества, всеобщее управление качеством, контроль качества в масштабах всей компании «CWQC», кружки качества и др.

**Необходимые действия для удачного использования методологии «TQM».** Итак, для успешного внедрения данной методологии в первую очередь необходимо освоить производство товара, пользующегося спросом, а также минимизировать затраты сырья, энергии, труда. После этого необходимо научиться управлять финансами и ориентировать уровень производства на критерии показателей национальной и международных премий по качеству.

Если ставить задачу использовать методологию «TQM», то рекомендуется последовательно осуществлять семь следующих шагов:

Шаг первый: провести анализ стартовых условий в отношении качества услуг, продукции и процессов.

Второй шаг: выполнить анализ несоответствий и их причин; провести их ранжирование на критические, значительные и малозначительные.

Третий шаг: внедрить систему мотивации за снижение несоответствий с прицелом на создание кружков и групп качества.

Четвертый шаг: согласовать возможности производства с требованиями конструкторской и технологической документацией.

Пятый шаг: внедрение системы статистического управления качеством.

Шестой шаг: организовать производственный процесс по принципу «производитель-внутрифирменный клиент (потребитель)», создать систему управления качеством, внедрить статистический приемочный контроль.

Седьмой шаг: наладить партнерское сотрудничество с поставщиками в форме инспекций и аудитов со стороны потребителя, наличие сертификационной продукции поставщика.

**Вывод.** Как видно из всего изложенного выше, украинскому предпринимательству предстоит сложная и затяжная борьба за выживание. Оказать помощь в расстановке акцентов в этой борьбе может система критериев, по которым присуждается национальная премия Украины по качеству. Критерии и максимальное количество баллов. Которые могут присуждаться следующие:

1. Обеспечение результатов (500 баллов): роль лидера – 100 баллов, стратегия и планирование – 80 баллов, управление персоналом – 90 баллов, управление ресурсами – 90 баллов, система качества и процессы – 140 баллов;

2. Результаты (500 баллов): удовлетворенность персонала – 90 баллов, удовлетворенность клиента – 200 баллов, влияние деятельности на общество – 60 баллов, деловые результаты – 150 баллов.

Всего – максимум 1000 баллов. Каждый критерий подразделяется на несколько подкритериев с указанием максимального количества баллов по каждому из них.

**Список литературы:** 1. Томпсон А.А., Стрикленд А.Дж., Стратегический менеджмент. Искусство разработки и реализации стратегии – М.: «Банки и биржи» 1998-573 с. 2. Фатхутдинов Р.А., Стратегический маркетинг – СПб.: ПИТЕР, 2006-352 с. 3. Мазур И.И., Шапиро В.Д., Управление качеством. Современное бизнес образование – М.: Высш. Шк., 2003-334 с. 4. Питер С Пенди, Роберт П. Ньюмен, Роланд Р. Кэвенг, Курс на Шесть Сигм. Как General Electrics, Motorola и другие ведущие компании мира совершенствуют свое мастерство. – М.: «ЛЮРИ», 2002-375 с. 5. Эрл Ньютон, Стивен Х. Хойсингтон., Качество на уровне Шесть Сигм. – Днепропетровск: Баланс-Клуб, 2004-440 с

*Поступила в редколлегию 05.05.07*

*Е. Н. КИШАНКОВА*, студентка НТУ «ХПИ»

## **ПЛАНИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ПРОДУКЦИИ В АКТИВНОЙ СИСТЕМЕ**

Робота присвячена проблемі вірогідності інформаційних потоків у дворівневій активній системі віялового типу. У рамках ТАС вирішується задача планування виробництва продукції. Як моделі підприємств використовується виробнича функція Кобба-Дугласа. На основі аналізу отриманих результатів розроблені рекомендації з ефективного керування компанією.

Работа посвящена проблеме достоверности информационных потоков в двухуровневой активной системе веерного типа. В рамках ТАС решена задача планирования производства продукции. В качестве моделей предприятий используется производственная функция Кобба-Дугласа. На основе анализа полученных результатов разработаны рекомендации по эффективному управлению компанией.

The work is devoted to problem of reliability of information flows in fan-type active two-tier systems. The problem of planning of output of products is solved using active systems theory. The Cobb-Duglas production function is used as a model of daughter enterprises. On basis of analysis of obtained results the recommendations about effective company management is proposed.

**Введение.** Рассматривается организационная экономическая система, состоящая из центра и дочерних предприятий. Центр управляет предприятиями с помощью разработанных законов управления, а предприятия сообщают центру оценки эффективности своей деятельности. Как правило, каждый элемент системы стремится оптимизировать сообщаемую информацию, вследствие чего происходит преднамеренное её искажение.

Обычно на практике центру приходится устанавливать фиксированную внутрифирменную цену. Это обусловлено тем, что трансфертная цена формируется на основе внешней цены продукта, которая напрямую зависит от цен фирм-конкурентов на такой же товар, уровня потребительского спроса и т. д., т. е. от внешних факторов. Поэтому в данной работе задача планирования производства продукции решается при условии, что центр руководствуется принципом жесткой централизации, внутрифирменная цена – фиксирована.

Анализ работ по ТАС показывает, что серьезные трудности с управлением возникают в случае минимально возможного состава активной системы, т. е. когда она состоит из центра и 2-ух дочерних предприятий. Эти трудности связаны с большими возможностями манипулирования информацией предприятиями. Рассмотрим именно этот случай.

В качестве адекватных моделей дочерних предприятий с высоким уровнем агрегирования целесообразно использовать степенную производственную функцию Кобба-Дугласа.

$$y_i = f(k_i, l_i) = A_i * k_i^\alpha * l_i^\beta, \quad (1)$$

где  $A_i$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  – постоянные величины, которые определяются эмпирическими данными, собранными при изучении конкретной производственной системы.

$A_i$  – правомерно трактовать как показатель эффективности производства продукции  $i$ -го предприятия, поскольку.

$$A_i = \frac{y_i}{k_i^\alpha * l_i^\beta}. \quad (2)$$

$k_i$ , – затраты капитала и труда  $i$ -го предприятия;

$y_i$  – объем конечного продукта, полученного в результате производства на  $i$ -ом предприятии;

$\alpha$ ,  $\beta$  – коэффициенты эластичности объема выпуска ( $Y$ ) по соответствующим факторам производства.

Существуют и более адекватные степенные производственные функции с учетом влияния НТП, фактора человеческого капитала, фактора информации и др., но учет всех составляющих производства ведет к чрезмерной сложности анализа и интерпретации результатов эффективного управления.

**Постановка задачи.** Цель дочерних предприятий - увеличить свою прибыль. Центр стремится распределить запланированный объем выпуска продукции между двумя дочерними предприятиями таким образом, чтобы минимизировать суммарные затраты. В нашем случае это затраты на труд, т.к. затраты капитала являются прозрачной заранее известной величиной для центра.

Строим экономико-математическую модель поведения активных элементов системы.

Выразим целевую функцию дочернего предприятия таким образом:

$$D_i(s) = A_i k_i^\alpha l_i(s)^\beta - l_i(s) \xrightarrow{s_i} \max, \quad i \in N, \quad N = [1; 2], \quad (3)$$

где  $D_i$  - прибыль  $i$ -го дочернего предприятия;

$s$  - оценки эффективности производства продукции;

$l_i$  - затраты на труд для  $i$ -го предприятия;

$k_i$  - капитальные вложения для  $i$ -го предприятия.

В целях упрощения выкладок принимаем, что для обоих предприятий показатели  $\alpha$  и  $\beta$  будут одинаковыми.

Управлениями центра будут являться  $y_i$  - части распределяемого им плана производства продукции ( $Y = \sum_{i=1}^{n=2} y_i$ ) и целевая ситуация центра выглядит таким образом:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n-2} l_i \xrightarrow{s_i} \min \\ \sum_{i=1}^n y_i = Y \end{cases} \quad (4)$$

Исходя из этого, центр формирует закон управления, который бы гарантированно привел систему в целевое состояние.

Чтобы выработать закон управления, запишем целевую функцию центра более подробно с учётом того, что истинных значений  $A_i$  центр не знает, а знает лишь оценки эффективности производства продукции  $s_i$ :

$$L = l_1 + l_2 = \beta \sqrt{\frac{y_1}{s_1 * k_1^\alpha}} + \beta \sqrt{\frac{Y - y_1}{s_2 * k_2^\alpha}} \xrightarrow{A_i} \min \quad (5)$$

Функция затрат имеет экстремум в минимальной точке и достаточно найти первую частную производную функции по  $s_i$ , приравняв полученное выражение 0 и таким образом определить зависимость планов производства от сообщаемых оценок при минимальных затратах труда. Преобразовав полученное выражение, получим закон управления центра:

$$y_1 = \frac{Y(s_2 k_2^\alpha)^{\frac{1}{\beta-1}}}{(s_1 k_1^\alpha)^{\frac{1}{\beta-1}} + (s_2 k_2^\alpha)^{\frac{1}{\beta-1}}} \quad (6)$$

В свою очередь:  $y_2 = Y - y_1$ .

Используя зависимость  $l_i(y_i)$  из функции Кобба-Дугласа, запишем целевые функции дочерних предприятий в более удобном для решения виде:

$$\begin{cases} D_1(s) = A_1 k_1^\alpha \left( \beta \sqrt{\frac{y_1}{s_1 * k_1^\alpha}} \right)^\beta - \beta \sqrt{\frac{y_1}{s_1 * k_1^\alpha}} \xrightarrow{s_i} \max \\ D_2(s) = A_2 k_2^\alpha \left( \beta \sqrt{\frac{Y - y_1}{s_2 * k_2^\alpha}} \right)^\beta - \beta \sqrt{\frac{Y - y_1}{s_2 * k_2^\alpha}} \xrightarrow{s_i} \max \end{cases} \quad (7)$$

Используя закон управления центра (формула 6), получим систему целевых функций, зависящих от сообщаемых оценок эффективности производства.

Для урегулирования конфликтных ситуаций между оппонентами активной системы воспользуемся математическим аппаратом ТАС и определим:

- стандартное гарантированное решение Нэша;
- точку максимальной суммы выигрышей ( $D_1 + D_2 \rightarrow \max$ );
- точку Эджворта ( $D_1 * D_2 \rightarrow \max$ ).

Так как в данном случае анализируется игра двух предприятий, то определение точки Нэша производится таким образом:

$$\begin{cases} \frac{\partial D_1}{\partial s_1} = 0 \\ \frac{\partial D_2}{\partial s_2} = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} f_1(s_1, s_2) = 0 \\ f_2(s_1, s_2) = 0 \end{cases} \Rightarrow \text{точка - Нэша}(s_1^*, s_2^*) . \quad (8)$$

Продифференцировав целевые функции предприятий, и приравняв их 0 по примеру формулы 8, получим систему уравнений, по решению которой получим точку Нэша. Точка Нэша:  $s_1=0, s_2=0$ .

В связи с тем, что точка Нэша находится в 0, с позиции центра становится целесообразным отследить ретроспективные параметры производственной деятельности предприятий и спрогнозировать их на плановый период. На этой основе центру придется установить приемлемые ограничения для предприятий на оценки коэффициентов эффективности. Очевидно, что в таком случае предприятия будут выходить на заданные ограничения и тогда задача решается элементарно - по формулам 1-6 вычисляются все показатели работы системы. Поэтому основное внимание теперь уделяется нахождению остальных стандартных решений.

Чтобы наглядно показать, каким образом происходит нахождение интересующих точек, рассчитаем пример на основе тестовых данных. Пусть центр знает, что фактор капитала, который представляет собой расходы на обслуживание оборудования, его ремонт, покупку нового, плату за аренду оборудования либо помещений и т.д., он потратит 5 (тыс. ден. единиц), при этом расходы будут распределены между дочерними предприятиями следующим образом:  $k_1=2, k_2=3$ .

Коэффициенты эффективности производства продукции по результатам прошлых отчетных периодов в исследуемой модели принимают значения:  $A_1=200, A_2=230$ ; коэффициенты эластичности выпуска по факторам труда и капитала:  $\alpha=0,75 \beta=0,25$ .

Ограничения на сообщаемые оценки коэффициентов эффективности производства продукции:  $s_1=185, s_2=225$ .

Центр ориентируется на то, что спрос равен предложению и запланированный объём производства продукции  $Y=10,869$  (тыс. ден. единиц). План производства распределяется между двумя предприятиями, поэтому можно записать:

$$A_1 k_1^\alpha l_1^\beta + A_2 k_2^\alpha l_2^\beta = Y . \quad (9)$$

А это значит, что  $l_2=l_2(l_1)$ , и целевые функции предприятия можно записать в следующем виде:

$$\begin{cases} D_1 = A_1 k_1^\alpha l_1^\beta - l_1 \\ D_2 = A_2 k_2^\alpha l_2(l_1)^\beta - l_2(l_1) \end{cases} . \quad (10)$$

Построим пространство игры в выигрышах предприятий и определим игровые точки на множестве Парето. Эти операции произведем с помощью средств MathCad (см. рис. 1).

```

D11 := for i ∈ 1..50
    l1 ← 0 + 0.1·i
    A1 ← 2
    A2 ← 2.3
    k1 ← 2
    k2 ← 3
    α ← 0.75
    β ← 0.25
    Y ← 10.869

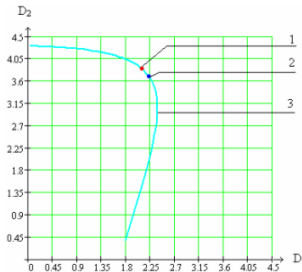
    l2 ←  $\left( \frac{Y - A1 \cdot k1^{\alpha} \cdot l1^{\beta}}{A2 \cdot k2^{\alpha}} \right)^{\frac{1}{\beta}}$ 

    D11(i) ←  $\begin{bmatrix} l1 \\ l2 \\ A1 \cdot k1^{\alpha} \cdot l1^{\beta} - 11 \\ A2 \cdot k2^{\alpha} \cdot l2^{\beta} - 12 \\ (A1 \cdot k1^{\alpha} \cdot l1^{\beta} - 11) \cdot (A2 \cdot k2^{\alpha} \cdot l2^{\beta} - 12) \\ (A1 \cdot k1^{\alpha} \cdot l1^{\beta} - 11) + (A2 \cdot k2^{\alpha} \cdot l2^{\beta} - 12) \end{bmatrix}$ 
D11
    
```

Рис. 1 Программный блок MathCad для определения пространства игры

В результате получим набор точек, из которых можно выделить: точку Эджворта:  $\max(D_1 \cdot D_2) = 8,210$  (тыс. ден. единиц); точку максимальной суммы выигрышей:  $\max(D_1 + D_2) = 5,940$  (тыс. ден. единиц); а также значения  $l_1, l_2, D_1, D_2$  в этих точках. Учитывая ограничение на сообщаемую информацию  $s_i = 185$ , по формулам 6-7 находим значения  $y_1, y_2, s_2$ .

С помощью графических средств MathCad построим пространство игры в выигрышах предприятий и изобразим интересующие нас решения (рис. 2).



1 – точка максимальной суммы выигрышей; 2 – точка Эджворта  
3 – пространство игры

Рис. 2. Решение игры в пространстве критериев

Данные результатов решения игры представлены в таблице:



Данные результатов решения игры

Переменные	Оптимально е решение	Точка Нэша	Точка Эджворта $\max(D_1 * D_2) = 8,212$	Точка max суммы $\max(D_1 + D_2) = 5,940$
$s_1$	200	185	185	185
$s_2$	230	220	222,8	216,9
$D_1$	2,116	2,013	2,222	2,096
$D_2$	3,694	3,694	3,694	3,844
$D$	5,81	5,707	5,916	5,940
$l_1$	1,756	1,974	1,5	1,8
$l_2$	3,173	3,843	3,452	3,129
$L$	4,349	5,817	4,952	4,929
$y_1$	3,872	3,688	3,698	3,896
$y_2$	6,997	7,181	7,171	6,973
$Y$	10,869	10,869	10,869	10,869

В зависимости от ориентации предприятий появляется возможность оценить эффективность типа поведения в точке Нэша, в точке Эджворта, в точке максимальной суммы выигрышей и сравнить полученные результаты с оптимальным решением игры, где  $s_1 = A_1$   $s_2 = A_2$ .

**Выводы.** По итогам решения численного примера получаем, что точка Нэша, дающая гарантированный выигрыш – не эффективна. Это говорит о том, что предприятиям целесообразно стремиться к определенному взаимодействию с целью получения большего выигрыша. Решение в точке максимальной суммы выигрышей предпочтительнее, чем в точке Эджворта, т.к. прибыль в нём достигает наибольшего значения, а затраты – наименьшего. Как показывает практика, в точке максимальной суммы выигрышей между предприятиями возникает жесткая борьба за перераспределение прибылей, что влечёт за собой соответствующие убытки. Поэтому центру предпочтительней ориентироваться на точку Эджворта.

**Заключение.** Большинство производственных функций в ТАС построены по принципу упрощения действительности ради простоты модели и работы с ней. В результате, параметры такой модели являются лишними общепринятого экономического смысла. С целью повышения адекватности моделей предприятий, используется ПФ Кобба-Дугласа, поэтому аналитическое решение задачи - трудоёмкое. За счёт того, что центр ставит задачу выпускать запланированное количество продукции, аналитическая сложность задачи снижена, а пространство игры принимает форму кривой, на которой нахождение интересующих решений представляется возможным.

**Список литературы:** 1. Щепкин А. В. Внутрифирменное управление (модели и методы). М.:ИПУРАН, 2001. 80 с. 2. Бурков В.Н., Новиков Д. А. Теория активных систем и задачи организационного управления. М, 2001. 365 с. 3. Бурков В. Н. Основы математической теории активных систем. М.: Наука, 1977. 289 с.

Поступила в редколлегию 22.05.07

**С. В. ШЕВЧЕНКО**, канд. техн. наук

## **УПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЕМ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ СТАДИИ ИХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА**

В статті пропонується підхід до управління розвитком складних систем з урахуванням стадій їх життєвого циклу. Підхід базується на побудові інтегральної характеристики ефективності функціонування на основі значень показників ефективності складових підсистем і компонент. Розглядаються характерні задачі управління розвитком для кожної стадії життєвого циклу системи.

В статье предлагается подход к управлению развитием сложных систем с учетом стадий их жизненного цикла. Подход базируется на построении интегральной характеристики эффективности функционирования на основе значений показателей эффективности составляющих подсистем и компонент. Рассматриваются характерные задачи управления развитием для каждой стадии жизненного цикла системы.

In the article the approach to management of development of complex systems is offered taking into consideration of a stage of their life cycle. The approach is based on construction of the integrated characteristic of efficiency of functioning on the basis of values of parameters of efficiency of subsystems and components. Characteristic problems of management of development for each stage of life cycle of system have been considered.

**Введение.** Развитие является необходимым аспектом деятельности любой сложной системы, обуславливающим ее жизнеспособность и возможность функционирования в конкурентной среде. Любая сложная система может быть декомпозирована на совокупность подсистем, функционирующих в соответствии с содержанием и особенностями реализуемых бизнес-процессов, образующих иерархическую структуру. В соответствии с жизненным циклом любого компонента системы можно рассматривать жизненный цикл содержащей его подсистемы более высокого уровня иерархии вплоть до системы в целом. Бизнес-процессы могут быть описаны ориентированным графом с заданными процедурами преобразования и обработки поступающих ресурсов компонентами системы, каждый из которых обладает определенной производительностью и эффективностью. В таком случае жизненный цикл системы ограничивается значением ее эффективности, допускающей функционирование с возмещением понесенных затрат. Потеря эффективности приводит либо к окончанию функционирования системы в ее первоначальном виде, либо к полной замене системы, либо к необходимости проведения реконструкции или реорганизации системы при условии, что восстановленная производительность и эффективность обеспечат ее конкурентоспособное состояние.

**Постановка задачи.** Для обеспечения эффективности текущего и будущего функционирования сложной системы необходимо выделение особенностей управления развитием системы на разных стадиях ее жизненного цикла, позволяющих выполнить формирование эффективных траекторий развития на основе использования адекватных моделей и процедур выбора эффективных решений с учетом возможностей финансирования и реализации.

Учитывая отмеченные особенности процесса функционирования, управление развитием может быть рассмотрено для стадий разработки и внедрения системы в эксплуатацию, собственно эксплуатации и стадии, сопровождающейся потерей эффективности.

На стадии разработки и внедрения системы основной задачей является определение ее архитектуры на основе прогнозируемых или планируемых объемов работ, вариантов комплектации ее компонентами в соответствии с заданными бизнес-процессами, финансовыми возможностями, номенклатурой пригодных к использованию компонент и устройств, существующих на рынке или готовящихся к производству, и интеграция их в единую систему, например [1]. Критериями эффективности принимаемых решений могут служить максимизация значения эффективности, ожидаемой прибыли или минимизация затрат на выполнение заданного объема работ с оценкой качества функционирования.

На стадии эксплуатации на первом месте находится задача обеспечения максимальной эффективности за счет оптимизация режимов функционирования, обеспечивающих максимальное использование ресурсов каждого компонента и системы в целом, а также - минимизации эксплуатационных затрат при заданном уровне надежности. На этом этапе может быть рассмотрена также задача прогнозирования состояния системы и ее составляющих с целью последующего формирования планов приобретения нового оборудования и оснащения вместо вышедшего из строя или имеющего ограниченный ресурс, его установки и введения в эксплуатацию.

На стадии потери эффективности основными задачами можно считать прогнозирование промежутка времени до достижения критического значения порога эффективности, проведение обоснования целесообразности реорганизации системы либо полного отказа от дальнейшей ее эксплуатации с возможным переходом к разработке новой системы с новыми возможностями и потенциалом и соответствующим задачам первого этапа в зависимости от финансовых возможностей и перспективных планов владельцев системы. Для этого сопоставляется величина требуемых затрат на восстановление утраченной эффективности и затрат на разработку, создание и ввод в эксплуатацию новой системы с ожидаемой эффективностью, новыми характеристиками и возможностями.

Для принятия решений необходимо получить оценку зависимости изменений интегральных характеристик системы во времени. Примером

интегральных характеристик эффективности системы могут служить данные, приведенные на следующем рисунке [2].



#### Интегральная оценка эффективности системы

Каждая точка интегральной характеристики системы определяется значениями производительности и соответствующей эффективности функционирования одного или нескольких компонент, узлов или подсистем в составе бизнес-процессов, выполняющие свои функции с полной загрузкой и максимальной производительностью, которые нельзя увеличить без замены их более эффективными и производительными или проведения реорганизации процессов функционирования.

Таким образом, для управления развитием сложной системы можно **рекомендовать** построение комплекса аналитических и имитационных моделей для каждой стадии с периодическим решением следующих задач, содержание которых определяется последующей выбранной стадией жизненного цикла системы:

1. Мониторинг и прогнозирование спроса на рассматриваемые услуги, работы или товары.
2. Мониторинг и прогнозирование состояния альтернативных систем выполнения рассматриваемых объемов работ.
3. Оценка требуемого объема спроса с учетом состояния альтернативных систем.
4. Оценка и прогнозирование технико-экономических характеристик составляющих компонент и подсистем, а также предлагаемых на рынке или готовящихся к производству.
5. Построение интегральных характеристик эффективности системы с учетом структуры и содержания ее бизнес-процессов и оценок изменения состояния компонент.

6. Выбор траектории развития системы из множества эффективных решений, построенного по результатам оптимизации системы с экономическими критериями и имитационного моделирования ее работы для оценки качества функционирования. Оценка возможностей и рисков финансирования, реализации и эксплуатации.
7. Принятие решения по реализации выбранного варианта или переход к следующей траектории развития с проведением указанных оценок.

**Автор считает, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты:** проанализированы особенности процессов управления развитием систем на разных этапах их жизненного цикла; выделены механизмы построения интегральных оценок эффективности системы на основе их связи со структурой и содержанием выполняемых бизнес-процессов, оценок изменения состояния компонент и траекторий их развития; построена последовательность этапов расчетов, применение которой позволяет выбирать варианты множества эффективных решений, наиболее полно соответствующих текущим и будущим требованиям с учетом предоставленных возможностей.

**Выводы.** Эффективное управление развитием сложной системы является одним из основных условий ее существования в условиях рыночной конкуренции. Для выбора траектории развития подобных систем как взаимоувязанных вариантов в последовательные моменты времени необходимо применение системного подхода с позиций учета динамики изменения спроса, состояния внешней среды, а также - используемых и разрабатываемых компонент и технологий.

**Заключение.** Управление развитием - это необходимый аспект деятельности любой сложной системы, обеспечивающий ее жизнеспособность в условиях рыночной конкуренции, возможность влиять на эффективность функционирования и длительность жизненного цикла. Управление развитием с учетом текущего состояния и стадии жизненного цикла сложной системы преследует различные цели, приводящие к различным наборам задач. Идентификация стадии жизненного цикла системы позволяет своевременно и эффективно применять управленческие решения, соответствующие характерным задачам текущей и последующим стадиям.

**Список литературы:** 1. Вишневикий В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. - М.: Техносфера, - 2003. - 512 с. 2. Шевченко С.В. Управление развитием распределенных технологических систем с учетом их жизненного цикла //Материалы XXXIV Междунар. конф. «Информационные технологии в науке, социологии, экономике и бизнесе. IT+SE'07. Майская сессия. Прилож. к журн. «Открытое образование». - Ялта-Гурзуф. - 2007. С.130-132.

*Поступила в редколлегию 29.05.07*

**А. С. КУЦЕНКО**, д-р. техн. наук,  
**К. А. СОКОЛИНСКИЙ**

## **ВЫДЕЛЕНИЕ ПОИСКОВОГО СПАМА НА ОСНОВЕ МЕРЫ ССЫЛОЧНОЙ СХОЖЕСТИ ВЕБ-СТРАНИЦ**

У статті описується міра посилальної схожості веб-сторінок і запропонований простий алгоритм для виділення кластерів веб-сторінок, підозрілих з точки зору використання посилального спама. Кластеризація ґрунтується на зваженому графі схожості сторінок, який може бути одержаний з орієнтованого графа зв'язків веб-сторінок.

В статье описывается мера ссылочной схожести веб-страниц и предложен простой алгоритм для выделения кластеров веб-страниц, подозрительных с точки зрения использования ссылочного спама. Кластеризация основывается на взвешенном графе схожести страниц, который может быть получен из ориентированного графа связей веб-страниц.

**Введение.** Бурное развитие Интернета в последние годы привело к тому, что «всемирная паутина» стала незаменимым источником информации во многих отраслях человеческой деятельности. Для многих пользователей поисковые системы стали отправной точкой при поиске информации в сети. Соответственно, поисковые машины стали одним из основных источников посетителей для многих сайтов. Для коммерческих сайтов увеличение количества посетителей оборачивается ростом прибыли [1].

Большинство поисковых сервисов возвращают отсортированный по релевантности запросу список сайтов в качестве результатов. Количество сайтов в результате поиска может доходить до сотен тысяч и для многих запросов пользователи просматривают только первые 10 [1]. Это ведет к тому, что создатели некоторых сайтов пытаются обмануть поисковые машины и искусственно поднять рейтинг своих сайтов в результатах поиска. Данное явление получило название «поискового спама» [2].

Первые поисковые системы использовали разнообразные методы информационного поиска для нахождения релевантных запросу документов. Позже было обнаружено, что эти методы не достаточны для получения ценной информации из сети, т.к. они не учитывают связь между документами на основе гиперссылок. Большинство современных поисковых систем также используют алгоритмы, основанные на анализе гиперссылок, для улучшения ранжирования результатов поиска.

Наиболее известными алгоритмам, используемыми для ссылочного ранжирования, являются PageRank[3] и HITS[4], которые анализируют структуру гиперссылок и рассчитывают рейтинг страницы на основе входящих и исходящих ссылок. Было показано [2], что оба алгоритма являются уязвимыми к «ссылочному спаму». Данный вид поискового спама основан на создании искусственных веб-страниц, повышающих рейтинг

необходимой страницы. Разновидностью данного вида спама также является создание ссылочных сетей, используемых для повышения рейтинга всех либо некоторых страниц из сети. Подробный анализ некоторых видов ссылочного спама можно найти в [5].

Метод, предложенный в данной статье, основывается как на личных наблюдениях структуры страниц и сайтов которые могут считаться спамом, так и на анализе и предположениях, сделанных в нескольких источниках [1, 5, 6, 7]. Целью данного метода является выделение групп веб-страниц (веб-сайтов) произвольной конфигурации, которые могут быть подозрительны с точки зрения использования ссылочного спама. Мы используем слово «подозрительны», т.к. отнесение веб-страницы (веб-сайта) к категории спама является субъективной мерой, которая может различаться от одной поисковой машины к другой.

### **Постановка задачи**

Введем представление множества страниц связанных гиперссылками в виде графа  $G=(V,E)$ , где  $V$  множество веб-страниц, а  $E$  множество ориентированных ребер  $\langle i,j \rangle$ . Множество  $E$  содержит ребро  $\langle i,j \rangle$ , если страница  $i$  ссылается на страницу  $j$ . Данному графу соответствует матрица смежности  $A_{ij}$ , где  $i,j \in V$ . Для данной матрицы  $A_{ij}=1$ , если множество  $E$  содержит ребро  $\langle i,j \rangle$ , и  $A_{ij}=0$  в противном случае.

На основе матрицы смежности графа  $G$  необходимо найти меру ссылочной схожести двух страниц и разработать алгоритм, позволяющий находить скопления (кластеры) схожих страниц.

Последующее изложение основано на некоторых предположениях и упрощениях. Будут рассматриваться только внешние гиперссылки, т.е. ссылки, ведущие за пределы доменного имени, в котором находится данная страница. Если страница содержит несколько идентичных ссылок, они будут рассматриваться как одна.

### **Мера ссылочной схожести**

Используя матрицу смежности  $A_{ij}$ , мы можем получить множества исходящих  $out(i)$  и входящих  $in(i)$  ссылок для любой вершины  $i \in V$ . Множество исходящих ссылок содержит страницы из множества  $V$ , на которые ссылается данная страница. Множество входящих ссылок содержит страницы из множества  $V$ , которые ссылаются на данную страницу.

Мера схожести двух веб-страниц  $i,j \in V$  на основе исходящих ссылок может быть определена в виде

$$Sout(i,j) = \frac{|out(i) \cap out(j)|}{|out(i) \cup out(j)|} \quad (1)$$

Мера  $Sout(i, j)$  показывает, как много общих ссылок содержат страницы  $i$  и  $j$ , в отношении к совокупному количеству ссылок на данных страницах. Значения  $Sout(i, j)$  принадлежат целочисленному интервалу  $[0,1]$ . Мера принимает значение равное 0, если нет ни одной общей исходящей ссылки для данных двух страниц. Если же все ссылки на данных двух страницах идентичны, то мера принимает значение равное 1. Если оба множества  $out(i)$  и  $out(j)$  пустые, то мера определяется равной 0.

Подобным же образом может быть определена мера схожести двух страниц  $i, j \in V$  на основе входящих ссылок

$$Sin(i, j) = \frac{|in(i) \cap in(j)|}{|in(i) \cup in(j)|}. \quad (2)$$

Данная мера обладает теми же свойствами, что и предыдущая. Она показывает насколько много страниц ссылается как на  $i$ , так и на  $j$ , в отношении к совокупному количеству страниц, которые ссылаются на эти две страницы. Если оба множества  $in(i)$  и  $in(j)$  пустые, то мера определяется равной 0.

Теперь мы можем ввести понятие меры схожести веб-страниц как линейной комбинации мер схожести на основе входящих и исходящих ссылок

$$S(i, j) = \alpha Sout(i, j) + (1 - \alpha) Sin(i, j), \quad (3)$$

где  $i, j \in V$ , а  $\alpha$  является варьируемым параметром и принадлежит интервалу  $[0,1]$ . Параметр  $\alpha$  определяет степень вклада входящих и исходящих ссылок в меру ссылочной схожести двух страниц. Значения меры принадлежат целочисленному интервалу  $[0,1]$ . Мера принимает значение 0, если страницы абсолютно не похожи в смысле ссылочной схожести и 1, если они идентичны. Стоит заметить, что интерпретация значений данной меры зависит от выбранного значения параметра  $\alpha$ .

После определения схожести двух страниц, на основе матрицы  $A_{ij}$  может быть построена матрица схожести страниц

$$S_{ij} = S(i, j), \forall i, j \in V. \quad (4)$$

Данная матрица является симметричной относительно главной диагонали и определяет схожесть всех веб-страниц принадлежащих графу  $G$ . Данная матрица может рассматриваться как матрица смежности полного взвешенного неориентированного графа  $GS \ll VS, ES >$  – графа схожести



страниц, где  $VS$  множество веб-страниц, а  $ES$  множество взвешенных ребер. Весом ребра  $\langle i, j \rangle$  является мера схожести двух страниц  $S(i, j), \forall i, j \in VS$ .

Стоит заметить, что существует возможность динамического варьирования значения параметра  $\alpha$  в зависимости от значений мер  $Sout(i, j)$  и  $Sin(i, j)$ . Это может быть использовано для обнаружения разных типов ссылочного спама.

### **Кластеризация на основе графа схожести страниц**

Для достижения поставленной цели, нахождения кластеров схожих страниц, можно воспользоваться алгоритмом выделения связанных компонент графа.

Задав пороговый параметр схожести  $R \in [0,1]$ , мы можем удалить из множества  $ES$  все ребра  $\langle i, j \rangle$ , для которых вес  $S(i, j) < R$ . После удаления этих ребер исходный граф разделится на несколько связанных компонент, которые и будут искомыми кластерами. Связные компоненты в модифицированном графе можно найти одним из классических методов теории графов.

Достоинством метода служит то, что могут быть найдены кластеры произвольно конфигурации. Недостатком данного метода является зависимость от параметра пороговой схожести, который необходимо задавать вручную.

Значение параметра  $R$  может быть подобрано эмпирически после анализа результатов разбиения на тестовой выборке.

### **Заключение**

В данной статье введено понятие ссылочной схожести веб-страниц и предложен простой алгоритм выделения кластеров страниц, которые могут быть подозрительны с точки зрения использования ссылочного спама. Данный метод планируется проверить на основе данных собранных с главных страниц веб-сайтов, входящих в украинский сегмент Интернет (около 100000 единиц). Также необходимо изучить влияние параметра пороговой схожести  $R$  на результаты кластеризации и возможность динамической вариации параметра  $\alpha$ . Возможность использования предложенного алгоритма для динамической фильтрации результатов поиска также требует проверки.

Данная работа была проделана при поддержке ЗАО «МЕТА» (<http://www.meta.ua>). Дальнейшие эксперименты планируется проводить как с использованием данных, предоставленных этой компанией, так и данных, которые возможно открыто получить от других компаний, разрабатывающих поисковые сервисы.

**Список литературы:** 1. *Baoning Wu and Brian D. Davison*. Identifying link farm spam pages. – In Proc. of the 14th International WWW Conference, 2005. 2. *Z. Gyöngyi and H. Garcia-Molina*. Web spam taxonomy. – In First International Workshop on Adversarial Information Retrieval on the Web, 2005. 3. *Lawrence Page, Sergey Brin, Rajeev Motwani, and Terry Winograd*. The PageRank citation ranking: Bringing order to the web. – Technical report, Stanford University, 1998. 4. *J. M. Kleinberg*.

Authoritative sources in a hyperlinked environment. – In proceedings of the 9th ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA), 1998. 5. Z. Gyöngyi and H. Garcia-Molina. Link spam alliances. – In Proceedings of the 31st International Conference on Very Large Data Bases (VLDB), 2005. 6. da Costa-Carvalho, A. L., Chirita, P.-A., de Moura, E. S., Calado, P., and Nejdl, W. Site level noise removal for search engines. – In Proceedings of the 15th international conference on World Wide Web, 2006. 7. G. Roberts and J. Rosenthal. Downweighting tightly knit communities in world wide web rankings. – Advances and Applications in Statistics (ADAS), 2005. – №. 3 – С. 199-216

*Поступила в редколлегию 16.05.07*

УДК 519.854.2

**О.А.ПАВЛОВ**, д-р. техн. наук, НТУУ «КПІ»,  
**О.Б.МІСЮРА**, канд. техн. наук, НТУУ «КПІ»,  
**О.А.ХАЛУС**, асп. НТУУ «КПІ»

### **ЗАДАЧА МІНІМІЗАЦІЇ СУМАРНОГО ЗАПІЗНЕННЯ ВИКОНАННЯ НЕЗАЛЕЖНИХ ЗАВДАНЬ З ДИРЕКТИВНИМИ СТРОКАМИ ОДНИМ ПРИЛАДОМ В СИСТЕМІ ПЛАНУВАННЯ ТА УПРАВЛІННЯ ДРІБНОСЕРІЙНИМ ВИРОБНИЦТВОМ (СПУДВ)**

В статті розглянута задача мінімізації сумарного запізнення виконання незалежних завдань з директивними строками одним приладом, яка входить до складу математичного забезпечення системи СПУДВ. Ця задача відноситься до NP-складних, що обумовлює складність пошуку не тільки точних методів розв'язання задачі, але і наближених. Запропоновано ефективний точний ПДС-алгоритм (алгоритм із поліноміальною й експоненційною складовими) розв'язання задачі, заснований на новому підході до розв'язання задач з директивними строками, що полягає в оптимальному використанні резервів часу незапізнених завдань.

#### **Вступ**

Задача сумарного зваженого запізнення привертає увагу вчених протягом багатьох років, але через надмірні обчислювальні вимоги точне розв'язання для задачі з 50 завданнями – це бар'єр, що практично неможливо перебороти.

Запропоновано новий підхід до розв'язання задачі і розроблений на його основі алгоритм, що дозволяє одержувати точні розв'язки для задач з числом змінних  $n > 500$  [1, 2]. Цей підхід заснований на конструктивній теорії розв'язання важкорозв'язуємих задач комбінаторної оптимізації, розробленої під керівництвом професора О.А. Павлова [3]. Основна ідея теорії полягає в дослідженні властивостей розглядуваних класів важкорозв'язуємих задач, доказі положень, правил, що дозволяють розробити єдиний принцип обчислень, і на їх основі побудові ПДС-алгоритмів.

### Загальна постановка задачі планування в системі СПУДВ

Задано множину операцій  $J = \{J_1, J_2, \dots, J_n\}$  по виготовленню  $n$  виробів, що розглядаються при формуванні портфеля замовлень (під виробом мається на увазі серія однотипних виробів). На кожній підмножині  $J_k$  задано частковий порядок орієнтованим ациклічним графом. Вершини графу відповідають операціям, зв'язки вказують на відношення передування. Відношення передування задається на основі конструкторсько-технологічної документації по виготовленню виробів, що входять у портфель замовлень. Кінцеві вершини відповідають готовим виробам. Для кожної вершини  $j$  графу відома  $lj$  – тривалість виконання, для кожного виробу  $i \in I$  ( $I$  – множина кінцевих вершин) задана вага  $\omega_i$ ; для окремих виробів задано директивний строк закінчення  $D_i$ . Для виконання операцій використовується система обслуговування у виді множини обмежених ресурсів. Сукупність виробничих засобів і приладів розділена на окремі, досить автономні виробничі модулі (комірки). Кожна комірка входить в одну з груп однотипних комірок. Виробництво характеризується різними технологічними циклами, широкими взаємозв'язками між підрозділами (комірками) по передачі виготовленої продукції.

Максимізація прибутку, як загальний критерій оптимальності для всіх рівнів моделі планування, грає важливу роль у визначенні спрямованості виробництва. У забезпеченні прибутковості підприємства істотне значення грає фактор часу. У вигравші буде той виробник, що забезпечує скорочення часу виходу на ринок нових виробів і підвищення гнучкості виробничого процесу. Вартість продукції, а, виходить, і прибуток підприємства за умови відсутності росту витрат виробництва, буде змінюватись в залежності від часу випуску виробів.

У випадку відсутності директивних строків прибуток від реалізації  $i$ -го виробу є функцією часу й дорівнює  $P_i(t) = \omega_i(T - C_i)$ , де  $\omega_i$  – вага виробу  $i$ , визначена як одиничний прибуток від реалізації  $i$ -го виробу;  $T$  – період часу, протягом якого гарантоване виконання всіх виробів;  $C_i$  – момент закінчення виготовлення виробу. Критерій максимізації сумарного прибутку підприємства в цьому випадку визначається виразом:

$$F_1 = \sum_{i=1}^n P_i(t) = \sum_{i=1}^n \omega_i(T - C_i) = T \cdot \sum_{i=1}^n \omega_i - \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot C_i \rightarrow \max .$$

Отже, критерій  $F_1$  еквівалентний критерію мінімізації сумарного зваженого моменту закінчення виготовлення виробів при заданому відношенні порядку на множині операцій кожного виробу:

$$\sum_{i=1}^n \omega_i \cdot C_i \rightarrow \min .$$

У системі СПУДВ розглядаються наступні критерії оптимальності і їх комбінації:

а) максимізація сумарного прибутку підприємства (критерій  $F_1$ ) у випадку, якщо директивні строки виробів відсутні (задача 1);

б) максимізація сумарного прибутку підприємства, якщо для всіх виробів  $i \in I$  не можуть бути порушені директивні строки  $D_i$  (планування «точно в строк», задача 2);

в) максимізація сумарного прибутку підприємства, якщо для деяких виробів  $i \in I$  не можуть бути порушені директивні строки  $D_i$  (задача 3);

г) максимізація сумарного прибутку підприємства за умови, що для всіх виробів задані директивні строки  $D_i$ . Необхідно мінімізувати сумарне зважене запізнення виготовлення виробів щодо директивних строків:

$$\sum_{i=1}^n \omega_i \max(0, C_i - D_i) \rightarrow \min \text{ (задача 4);}$$

д) максимізація сумарного прибутку підприємства за умови, що для всіх виробів задані директивні строки  $D_i$ . Необхідно мінімізувати сумарне зважене запізнення виготовлення виробів щодо директивних строків, якщо для деяких виробів  $i \in I$  директивні строки  $D_i$  не можуть бути порушені (задача 5);

е) максимізація сумарного прибутку підприємства у випадку, коли для всіх виробів  $i \in I$  задані директивні строки  $D_i$ , задана також абсолютна величина прибутку  $\omega_i$ , що не залежить від моменту закінчення виконання виробу у випадку, якщо виріб виконується без порушення директивного строку, інакше прибуток підприємства по цьому виробу дорівнює нулю. Критерій оптимальності:

$$\sum_{i=1}^n \omega_i \zeta_i \rightarrow \max, \text{ де } \zeta_i = \begin{cases} 1, C_i \leq D_i \\ 0, C_i > D_i \end{cases} \text{ (задача 6);}$$

ж) максимізація сумарного прибутку підприємства за умови, що для всіх виробів задані директивні строки  $D_i$ . Необхідно мінімізувати сумарний штраф підприємства за випередження або запізнення щодо директивних строків:

$$\sum_{i=1}^n \omega_i |C_i - D_i| \rightarrow \min \text{ (задача 7).}$$

Основу системи СПУДВ складає тривірнева модель.

У задачах погодженого планування як критерій оптимальності доцільно прийняти мінімум запізнення щодо планових строків запуску і випуску партій деталей (складальних одиниць) на всіх стадіях виробничого процесу з урахуванням наявних ресурсів і обмежень. Цей показник забезпечить своєчасний випуск виробів, зниження додаткових витрат у виробництві і, отже, відповідає головній меті оперативного управління виробництвом –

виконанню плану випуску продукції по номенклатурі, кількості, якості і строкам з найменшими витратами і, тим самим, досягненню найкращих кінцевих результатів.

На третьому рівні будується поопераційний план функціонування комірков з прив'язкою до устаткування (внутрішньокміркове планування) за критеріями мінімізації штрафу підприємства за несвоєчасне виконання виробів, для яких задані директивні строки. Ці критерії повинні бути погодженими із критерієм оптимальності діяльності підприємства. На цьому рівні розв'язуються наступні задачі (як для одного, так і для паралельних приладів, у випадку незалежних або взаємозалежних завдань) [4]:

(1) Мінімізація сумарного запізнення виконання множин завдань з директивними строками одним приладом;

(2) Мінімізація сумарного зваженого запізнення виконання множини завдань із різними директивними строками;

(3) Мінімізація сумарного запізнення виконання множини завдань із загальним директивним строком;

(4) Мінімізація сумарного зваженого запізнення виконання множини завдань за умови, коли для частини завдань заборонені порушення директивних строків;

(5) Мінімізація сумарного зваженого запізнення виконання множини завдань за умови, коли для частини завдань заборонені випередження й запізнення щодо директивних строків;

(6) Мінімізація сумарного зваженого запізнення виконання множини завдань за умови мінімізації числа переналадок в комірках.

(7) Мінімізація сумарного випередження – запізнення виконання завдань відносно директивних строків.

Розглянемо задачу мінімізації сумарного запізнення виконання множин завдань з директивними строками одним приладом. Наведена задача відноситься до NP-складних, що обумовлює складність пошуку не тільки точних методів розв'язання цих задач, але і наближених. Існуючі методи дозволяють розв'язати задачі невеликої розмірності. Наведемо постановку задачі.

**“Мінімізація сумарного запізнення виконання незалежних завдань з директивними строками одним приладом” (МСЗ)**

Припустимо, що задано множину незалежних завдань  $J = \{j_1, j_2, \dots, j_n\}$ , кожне з яких складається з однієї операції. Для кожного завдання відома тривалість виконання  $l_j$  і директивний строк виконання  $D_j$ . Завдання надходять у систему одночасно в момент  $d_j = 0, j = \overline{1, n}$ . Переривання не допускаються. Необхідно побудувати розклад виконання завдань для одного приладу, що мінімізує сумарне запізнення при виконанні завдань:

$$f = \sum_{i=1}^n \max(0, C_i - D_i),$$

де  $C_j$  – момент завершення виконання завдання  $j$ .

Огляд відомих методів розв'язання цієї задачі приведений у [1]. Згідно Ду і Люнгу, задача є NP-складною. Еммонс розробив правила домінантності, що були застосовані в алгоритмах гілок і границь, так само як і в алгоритмах динамічного програмування. Алгоритм динамічного програмування Шрейга і Бейкера знаходиться в категорії другого покоління, тому що він розв'язує задачі з кількістю завдань до 50-ти для  $1 \leq l_k \leq 10$ . Лоулер знайшов, що задача може бути декомповована на підзадачі, визначаючи позицію роботи з найбільшим часом виконання в оптимальній послідовності. Потім він представив правило для зменшення списку можливих позицій. Цей список надалі коротшає завдяки правилам Поттса і Ван Вассенгова і Шварца. Останні алгоритми третього покоління Поттса і Ван Вассенгова комбінують результат Лоулера – спочатку розбити задачу на підзадачі припустимі розмірності, а потім розв'язати кожну підзадачу динамічним алгоритмом Шрейга і Бейкера. Вони були здатні розв'язати задачі з кількістю завдань до 100 при  $1 \leq l_k \leq 100$ . Поттс і Ван Вассенгов указують, що для розв'язання задач з більш, ніж 100 завданнями необхідний новий підхід. Для розв'язання даної задачі створені конструктивні і декомпозиційні евристики; найбільш відомі з них досліджуються в [1], де показано, що усі вони представляють дуже погані нижні границі коефіцієнтів апроксимації: їх нижні розглядається алгоритм четвертого покоління, що ефективно розв'язує задачі з кількістю завдань до 150. Найсучасніший точний метод Шварца, Гроссо і Кросе може розв'язувати задачі з розмірністю до 500 робіт.

На кафедрі АСОІУ було запропоновано ефективний точний ПДС-алгоритм (алгоритм із поліноміальною й експоненційною складовими) розв'язання задачі, заснований на новому підході до розв'язання задач з директивними строками, що полягає в оптимальному використанні резервів часу незапізнених завдань, що дозволяє розв'язувати задачі з числом завдань, суттєво більшим, ніж 500 [2].

Алгоритм розв'язання задачі для одного приладу за вище наведеним критерієм заснований на твердженні, що якщо в послідовності  $\sigma^{yn}$  (послідовності, у якій завдання  $j \in J$  упорядковані за неспаданням відношення  $a_j/C_j$ ) запізненим завданням не передують завдання з резервом часу, то не існує переносів завдань, що приводять до покращення цільової функції [2]. Алгоритм полягає в динамічному пошуку найбільш ефективного використання запізненими завданнями резервів часу незапізнених завдань, у результаті чого значення функціонала зменшується. В результаті аналізу послідовності  $\sigma^{yn}$  визначається множина конкуруючих запізнених завдань, тобто тих завдань, які можуть претендувати на резерви незапізнених завдань.

В алгоритмі використовуються наступні типи перестановок і вставок.

Перестановки: а) завдань, для яких резерв часу більше нуля; б) завдань, що використовували резерви в результаті перестановок і вставок, якщо за ними слідує запізнєні завдання вищого чи рівного пріоритету. Перестановки здійснюються, якщо при їх виконанні значення функціонала зменшується.

Вставки: а) при наявності резервів на інтервалі вставки; б) при утворенні резервів на інтервалі вставки завданнями, що раніше використовували ці резерви у результаті виконання перестановок.

Число ітерацій запропонованого в [2] алгоритму визначається кількістю конкуруючих завдань. На кожній ітерації перевіряється можливість використання резервів часу попередніх завдань наступним конкуруючим завданням і будується оптимальний розклад розглянутої послідовності. На першій ітерації будується оптимальний розклад для завдань на інтервалі  $\overline{1, g_1}$ , де  $j_{[g_1]}$  – перше запізнєне конкуруюче завдання в послідовності  $\sigma^{cn}$  (отриманій у результаті вільних перестановок [2]). На наступній ітерації розглядається послідовність завдань на інтервалі  $\overline{1, g_2}$ , де  $j_{[g_2]}$  – наступне запізнєне конкуруюче завдання. Нехай вже виконана  $k-1$  ітерація і побудований оптимальний розклад для послідовності завдань на інтервалі  $\overline{1, k-1}$ , переходимо до наступного запізнєного конкуруючого завдання  $j_{[k]}$  і будемо оптимальний розклад для підпослідовності  $\sigma^k$ , що включає завдання на інтервалі  $\overline{1, k}$ . Перевіряється можливість зменшення значення функціонала за рахунок використання завданням  $j_{[k]}$  існуючих резервів часу чи резервів, отриманих у результаті перестановок завдань з мітками (чи завдань меншого пріоритету) на більш пізні позиції. На кожній ітерації значення функціонала зменшується чи залишається незмінним. В процесі розв'язання задачі перевіряються умови [2], при виконанні яких оптимальний розклад досягається за поліноміальний час (поліноміальна складова алгоритму). При цьому частина конкуруючих завдань виключається з множини конкуруючих. При невиконанні умов задача розв'язується експоненціальною складовою алгоритму. Таким чином, будується оптимальний розклад по зазначеному критерію.

### **Висновок**

Розглянута NP-складна задача «Мінімізація сумарного запізнєння виконання незалежних завдань», яка відноситься до третього рівня системи СПУДВ, та запропоновано новий ефективний ПДС-алгоритм, заснований на новому підході до розв'язання задач з директивними строками, який полягає в оптимальному використанні резервів часу незапізнєних завдань, що

дозволяє отримати точні розв'язки для задач з числом завдань, суттєво більшим, ніж існуючими методами.

**Список літератури:** 1. Павлов А.А., Теленик С.Ф. Информационные технологии и алгоритмизация в управлении.– К.: Техника.– 2002.– 344 с. 2. Павлов А.А., Мисюра Е.Б. Эффективный точный ПДС-алгоритм решения задачи о суммарном запаздывании для одного прибора // Системні дослідження та інформаційні технології.– 2004.– №4.– С.30-59. 3. Pavlov A.A, Pavlova L.A. PDC-algorithms for intractable combinatorial problems. Theory and methodology of design.– Uzhhorod: «Karpatskij region» shelf, 1997.– 320 p. 4. Павлов О.А., Мисюра О.Б., Халус О.А. Аналіз складності та ефективності розв'язання задач третього рівня системи планування та управління дрібносерійним виробництвом. / Вісник НТУУ “КПІ”. Інформатика, управління та обчислювальна техніка. К.: “ВЕК+”, 2006.– №44.– С.14-20

*Поступила в редколегію 10.05.07*

УДК 519.685

***И.П. ГАМАЮН***, д-р техн. наук, ***В.А. КОМАРЧУК***

## **ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ СЛУЖБОЙ ЗАКАЗОВ ТАКСИ**

В статті пропонується імітаційна модель процесу функціонування служби заказів таксі, що розроблена на основі GPSS (General Purpose Simulation System). Ця модель дозволяє в достатньо повній мірі відзеркалити особливості функціонування служби заказів, як системи масового обслуговування.

В статье предлагается имитационная модель процесса функционирования службы заказов такси, разработанная на основе GPSS (General Purpose Simulation System). Эта модель позволяет в достаточно полной мере отобразить особенности службы заказов, как системы массового обслуживания.

In article proposed the simulation model of functioning of service of orders of a taxi on basis GPSS (General Purpose Simulation System). This model allows to display the full features of functioning of service of orders of a taxi, as queue system.

**Введение.** Увеличение объема информации, поступающей в органы управления, усложнение задач управления, необходимость учета большого числа взаимосвязанных факторов и быстро изменяющейся обстановки требуют использования в процессе принятия решения нового класса систем – систем поддержки принятия решений (СППР) [1,2]. Эти системы находят свое применение во всех сферах управленческой деятельности человека. Одной из них является служба заказов такси, для которой в условиях мегаполиса характерны особенности, предопределяющие необходимость разработки и использования СППР. Современные компании, предоставляющие транспортные услуги, связывают дальнейшее повышение



эффективности своего функционирования с внедрением СППР службы заказов такси, как основного звена при решении сложной задачи о назначении конкретного транспортного средства для обслуживания клиента исходя из целого ряда условий: возможностей транспортного средства и его местоположения, требований клиента и его индивидуальных характеристик и т.д. Для принятия обоснованного решения необходимо сформировать полное множество вариантов решений по каждому заказу и оценить их с точки зрения заданного критерия (или критериев) оптимальности.

Важным этапом в процедуре принятия обоснованного решения является разработка имитационных моделей, с помощью которых получают количественные оценки вариантов возможных решений. В данной работе предлагается имитационная модель процесса функционирования службы заказов такси, разработанная на основе GPSS (General Purpose Simulation System) World, что позволяет в достаточно полной мере выразить особенности службы как системы массового обслуживания [3,4].

**Описание имитационной модели.** Исследуется процесс функционирования службы заказов такси, в которой  $n_1$  телефонных линий (каналов обслуживания). Если заказчик (пришедший заказ) застаёт одну из телефонных линий свободной, то его заказ становится в очередь на транспортное средство, если она не превышает  $N$  заказов. Для каждого заказчика существует свой приоритет. В зависимости от принадлежности к той или иной категории заказчик занимает позицию в очереди. Если все телефонные линии заняты, то заказчик повторяет попытку сделать заказ через  $t_3$  секунд. Если в очереди есть заказы, то транспорт «выбирает» для обслуживания первого клиента из очереди с первым приоритетом. Если она пуста, то для обслуживания выбирается первый заказ из очереди с вторым приоритетом, если она тоже пуста, то выбирается клиент с приоритетом 3. Выбранная очередь уменьшается на единицу. Все остальные заказы в этой очереди, если они есть, продвигаются на одну позицию вперед. Если в очереди нет заказов, то автомобиль остается в состоянии «свободен» до прихода следующего заказа.

С точки зрения объектного подхода имеются динамические объекты – требования (заказы) и некоторые ресурсы – устройства обслуживания (машины). Если требование претендует на ресурс, а они все заняты, то оно становится в очередь к ресурсу. Правило обслуживания – FIFO.

Для каждой пары «требование-ресурс» необходимо определить, как долго требование  $i$  будет использовать ресурс  $j$ , то есть необходимо определить интервал времени, когда требованию  $i$  назначен ресурс  $j$  и когда оно освободит этот ресурс.

Опишем алгоритм работы системы с точки зрения «жизненного цикла» заказа, т.е. от момента поступления (принятия) заказа до момента доставки клиента на место. Т.к. заказы непрерывно поступают на  $n_1$  каналов, то необходимо обеспечить поток заявок путем их создания в модели. Для

генерации заказов используют специальную подпрограмму ГЕНЕРАТОР (GENERATE).

Описание процесса использования ресурса требованием целесообразно разбить на подпрограммы:

12. запрос – назначение ресурса  $j$  требованию  $i$  (SEIZE, ENTER);
13. обслуживание требования  $i$ , что предполагает создание уведомления о событии в списке будущих событий для передачи управления подпрограмме освобождения ресурса  $j$  требованием  $i$  (ADVANCE);
14. освобождение ресурса  $j$  требованием  $i$  (RELEASE, LEAVE);
15. уничтожение требования (TERMINATE).

Кроме перечисленных подпрограмм необходимо программа управления процессом моделирования, которая запускает процесс моделирования и отслеживает движение каждого требования по модели путем вызова названных подпрограмм обработки событий. Также программа управления процессом моделирования ведет список упорядоченных во времени событий и продвигает часы модельного времени от события к событию. Структурная схема имитационной модели представляется на рис.1.

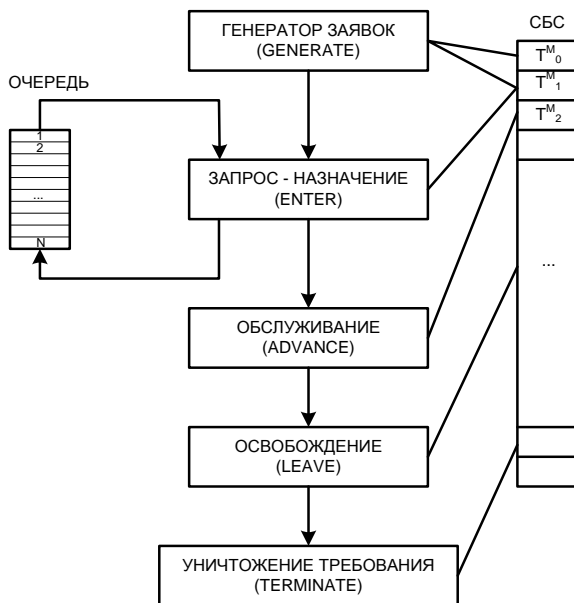


Рисунок 1 – Структурная схема имитационной модели

Необходимо сформировать поток заказов, поступающих на обслуживание в службу заказов такси. Для этого опишем функцию согласно терминологии

GPSS (для варианта с законом поступления заявок в модель Эрланга второго порядка):

```
EXPDIS FUNCTIONRN1,C24
0,0/.100,.104/.200,.222/.300,.355/.400,.509
.500,.690/.600,.915/.700,1.200/.750,1.380
.800,1.600/.840,1.830/.880,2.120/.900,2.300
.920,2.520/.940,2.810/.950,2.990/.960,3.200
.970,3.500/.980,3.900/.990,4.600/.995,5.300
.998,6.200/.999,7/1,8
```

Тогда закон поступления заявок будет выглядеть следующим образом:

```
GENERATE ,,1
SDFG_KAN1          ADVANCE    t1/2, FN$EXPDIS
                   ADVANCE    t1/2, FN$EXPDIS
                   split      1, SDFG_KAN1
```

В нулевой момент времени в модель вводится транзакт. Этот транзакт в каждом из двух последующих блоков ADVANCE задерживается на экспоненциально распределенный промежуток времени. Блок SPLIT создает копию транзакта и направляет ее на блок с меткой SDFG\_KAN1, исходный транзакт поступает в модель и т.д.

Если заказ принят, то он сначала занимает место в очереди, если она есть. Такое действие моделируется оператором QUEUE (очередь), который используется только вместе с оператором DEPART (выйти). Очередь на обслуживание запишется в виде QUEUE QZAKAZ, где QZAKAZ – имя очереди.

Так как существует ограничение на длину очереди – N заказов, то записи с постановкой заказа в очередь предшествует блок, осуществляющий проверку данного условия:

```
test LE    Q$ZAKAZ, ZAK, T,
```

где Q\$ZAKAZ – текущее значение длины очереди;

ZAK – ограничение на очередь, задаваемое пользователем;

T – метка перехода транзакта, при условии, что уже ZAK заказов в очереди.

Заказ покидает очередь после освобождения автомобиля, т.е. когда переходит к обслуживанию автомобилем. Автомобиль переходит в состояние “занят”.

Опишем это:

```
ENTER    KOL_AUTO
```

```
...
```

```
LEAVE    KOL_AUTO
```

Оператор ENTER означает, что система многоканальная и возможно определенное количество таких автомобилей.

Время обслуживания транзакта автомобилем описывается:

```
ADVANCE t4,t5,
```

Что обеспечивает увеличение модельного времени на величину  $t4 \pm 15$  минут.

Поскольку заказ обслуживается автомобилем, то он освободил место в очереди – DEPART QZAKAZ.

Запись TEST LE P5,2,GO\_TER – обеспечивает выполнение условия о том, что если клиент звонил больше трех раз, то он больше не пытается дозвониться, т.е. транзакт покидает модель.

Запись T ADVANCE 60 означает, что абонент через 60 секунд повторяет попытку сделать заказ.

Запись TRANSFER ,KAN обеспечивает переход к блоку с меткой KAN

Для подсчёта дохода от обслуживания клиентов за время работы службы заказов такси, реализуемой в данной модели необходимо ввести блок сохраняемой величины:

SAVEVALUE SKOL+,(1) – количество обслуженных заказов за время моделирования.

savevalue STOIM+,(P8#p6#stoim\_1km#0.001+ZAKAZ),

где P6, P8 – стандартные числовые атрибуты, в которые заносится скорость движения автомобиля и время обслуживания клиента;

STOIM\_1KM – стоимость проезда одного километра, задаваемая пользователем;

ZAKAZ – стоимость заказа такси, задаваемая пользователем.

Окончание обслуживания заказа службой заказов такси осуществляется в модели с помощью оператора TERMINATE без параметров.

После описания общих положений функционирования службы заказов такси необходимо создать сегмент, который будет моделировать работу службы заказов такси в течение рабочей смены, что требуется условием задачи. Для этого необходимо перевести значение длины смены во время моделирования системы, которое будет равно 28800 секунд.

Этот сегмент имеет вид:

GENERATE 28800

TERMINATE 1

Для запуска моделирования используется оператор START.

Процесс реализации оболочки взаимодействия пользователя с имитационной моделью сопровождался разработкой диаграммы вариантов использования, описываемой согласно терминологии UML. На рисунке 2 изображена данная диаграмма.

Непосредственно имитационная модель реализуется в среде GPSS World. Для удобства взаимодействия с имитационной моделью, передачи необходимых параметров описываемой системе, а также для удобства хранения статистических данных, полученных в результате проведения экспериментов с имитационной моделью необходимо реализовать интерфейс пользователя. Для написания данного интерфейса был выбран объектно-ориентированный язык программирования C++ в среде CBuilder.

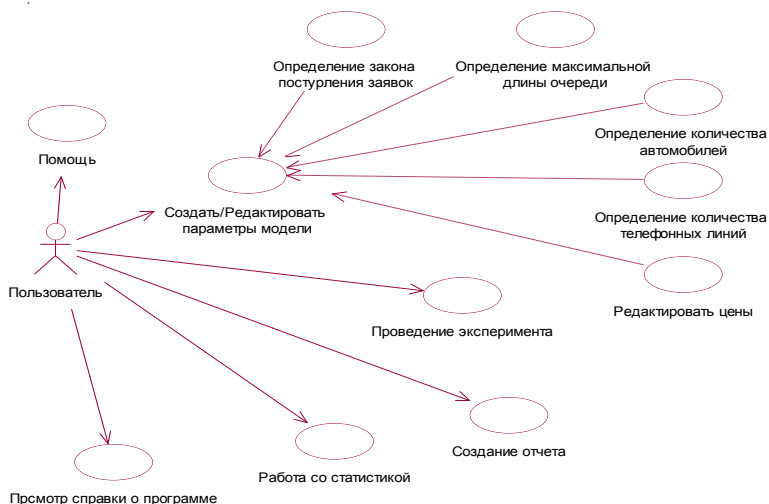


Рисунок 2 – Диаграмма вариантов использования

**Основные результаты**, полученные на основе обработки экспериментов с имитационной моделью, включают среднее время обслуживания клиентов различных категорий службой заказов такси, количество обслуженных заказов различных категорий за 8 часов работы и выручку за 8 часов работы при изменении основных характеристик службы заказов такси, приведенных в таблице.

Таким образом, при использовании построенной имитационной модели можно провести множество экспериментов с различными входными параметрами, которые задаются пользователем. В процессе работы с имитационной моделью службы заказов такси были полученные отчёты с результатами прогона модели для каждого варианта входных параметров, а также графическая интерпретация некоторых параметров.

#### Характеристики службы заказов такси

Параметры	Варианты		
	1	2	3
Кол-во каналов	Задаются пользователем		
Кол-во автомобилей	Задаются пользователем		
Среднее время обслуживания клиента, мин	40±10	45±15	40±20
Скорость движения машин, км/ч	40±5	43±7	45±5
Стоимость предварительного заказа, грн	Задаются пользователем		
Стоимость 1 км проезда(для различных категорий клиентов), грн	Задаются пользователем		

Надо принять во внимание, что по оси абсцисс откладывается значение модельного времени (28800 с), а по оси ординат – значение отображаемого параметра

На данном рисунке представлено три графика:

Длина очереди QZAKAZ умноженная на 100. График необходим для получения информации об изменении длины очереди за время моделирования. На данном графике можно видеть, что очереди в начале работы службы заказов такси нет. Но по мере поступления заказов она увеличивается до максимального своего значения. Это говорит о том, что автомобилей недостаточно, они не справляются с объемом заказов. Вследствие чего, увеличивается время ожидания клиентов в очереди.

Коэффициент использования устройства KOL\_AUTO. График необходим для получения наглядной информации о степени использования устройства. В данном случае, можно сказать, что в первые несколько часов работы автомобили работают с неполной загрузкой. Это объясняется тем, что поступлений заказов в первые часы работы меньше, чем в остальную часть дня. Далее загрузка автомобилей становится более равномерной, и практически достигает своего максимума.

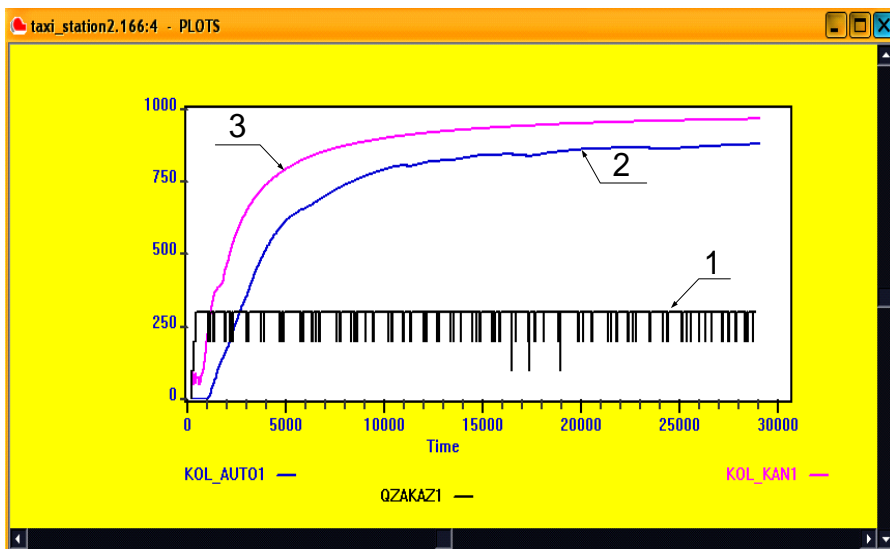


Рисунок 3.1 – Графики изменения параметров

Коэффициент использования устройства KOL\_KAN. График необходим для получения наглядной информации о степени использования каналов связи. Этот график наглядно показывает, что загрузка телефонных линий в первые часы работы меньше, чем в остальную часть дня и к середине

рабочего дня достигает критического значения загруженности. Коэффициент загруженности каналов связи превышает коэффициент загруженности автомобилей. Можно сделать вывод, что каналов связи не достаточно.

Проанализировав графики можно сделать вывод, что с течением времени в системе наблюдается относительно равномерные показатели функционирования службы заказов такси, однако устройство, отображающее работу автомобилей, используется недостаточно эффективно. Коэффициент использования автомобилей – 0,736. Но с экономической точки зрения, это более выгодно, т.к. уменьшаются затраты на бензин, тех. обслуживание и т.д.

При увеличении коэффициента использования автомобилей до 100% увеличивается вероятность частых поломок и выхода устройств из строя.

Количество каналов обслуживания для данного варианта службы заказов такси - 5 штук. Коэффициент использования равен 97,7%. Это говорит о том, что каналы загружены работой практически полностью. Данная загрузка может привести к повышенной частоте поломок и выходу устройств из строя. Руководству службы заказов такси следует рассмотреть данный структурный элемент системы, т.к. он является «узким местом» или зоной повышенного риска, вследствие того, что выход из строя даже на короткое время хотя бы одного канала связи приводит к сбою в работе службы заказов такси.

Аналогичный анализ может быть осуществлен для любого из проведенных экспериментов.

**Заключение.** Разработанная имитационная модель в среде GPSS World учитывает в достаточно полной мере особенности службы заказов такси как системы массового обслуживания. Эксперименты с имитационной моделью позволяют получить статистики моделирования, обработка которых позволяет оценить эффективность функционирования службы с точки зрения таких параметров, как среднее время обслуживания клиентов различных категорий, количество обслуженных заказов различных категорий за 8 часов работы и выручку за 8 часов работы.

**Список литературы:** 1. Ларичев О.И., Петровский А.Б. Системы поддержки принятия решений. Современное состояние и перспективы развития. // Итоги науки и техники. Серия Техническая кибернетика. – Т.21. М.: ВИНТИ - 1987. 2. Keen P.G.W. Decision Support Systems: The next decades // Decision Support Systems, 1987. – v. 3. - pp. 253-265.. 3. Томашевский В.Н., Жданова Е.Г. Имитационное моделирование в среде GPSS. – М.: Бестселлер, 2003. – 416 с. 4. Шрайбер Т.Дж. Моделирование на GPSS. – М.: Машиностроение. – 1980. -593 с.

*Поступила в редколлегию 24.04.07*

*С. Ф. АРТЮХ*, д-р техн. наук; профессор УИПА  
*А. Л. КУХАРЕВ*, инж.; ОАО «Стахановский завод ферросплавов»

## **ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ФЕРРОСПЛАВНЫХ ПЕЧЕЙ**

Розроблена імітаційна модель системи електроживлення ферросплавних печей у середовищі Matlab/Simulink, приведені алгоритми та програмні модулі, що дозволяють автоматизувати процес розрахунку та аналізу їх стаціонарних і динамічних режимів. Імітаційна модель вміщує підмоделі електропічних трансформаторів та ферросплавної печі з нелінійними моделями дуг змінного струму. За допомогою створених моделей виконані розрахунки електричних характеристик систем електроживлення ферросплавних печей, що виплавляють феросиліцій та кремній.

The imitative model of power supplies systems of the submerged-arc furnaces for production of silicon metal and ferrosilicon is developed. The algorithms and program modules allowing automating procedure of account and the analysis of their stationary and dynamic modes are offered. The imitative model includes submodels of furnaces transformers and internal resistances of the furnace and nonlinear models of AC arc. Electrical characteristics of the power supplies systems are made.

Современные технологии производства сталей требуют наличия различных видов ферросплавов, используемых в металлургическом процессе для раскисления и придания легирующих свойств выплавляемому металлу. Большинство ферросплавов производят электротермическим способом в специальных ферросплавных электропечах, единичные мощности которых на Украине достигли 80 МВА [1]. В отличие от дуговых сталеплавильных печей, в ферросплавных печах преобразование электрической энергии в тепловую осуществляется не только в электрической дуге, но и в зонах с различным агрегатным состоянием материалов: в твердой и размягченной вследствие нагрева шихте, а также в жидком расплаве конечного продукта и шлака.

Производительность печей и другие технико-экономические показатели их работы во многом определяются электрическим режимом их систем электропитания (СЭП). Для повышения эффективности их функционирования широко используются методы математического моделирования, при этом в течение длительного времени модели ферросплавных печей и СЭП рассматривались как два независимых направления. Так, модели ферросплавных печей, как правило, представлялись в виде схемы замещения, в которой отражалась структура рабочего пространства ванны печи, как элемента электрической цепи [2, 3]. В то же время в моделях СЭП [4] подэлектродное строение ферросплавной печи не учитывалось. Такой подход не всегда давал возможность получить желаемый результат в полном объеме, т.к. в случае его использования не учитывается вся гамма взаимосвязей и взаимных влияний СЭП и ферросплавных печей. В



частности, переключение ступеней напряжения в электропечных трансформаторах приводит не только к изменению его вторичного напряжения и эквивалентного сопротивления печного контура, но и к изменению мощности печи, условий горения дуг, а это в свою очередь влияет на производительность и удельный расход электроэнергии печи. Изменение электрических параметров печи также определяет изменение потерь электроэнергии в СЭП и в целом величину подводимого к печи напряжения и т.д. Поэтому при решении поставленной выше проблемы ферросплавную печь и СЭП необходимо рассматривать как единую взаимосвязанную динамическую систему. Для этого перспективным представляется метод имитационного моделирования в среде Matlab/Simulink, с помощью которого можно удобно и наглядно анализировать их стационарные и динамические режимы сложных систем [5, 6] При этом анализ литературных источников показал, что созданию имитационных моделей СЭП ферросплавных печей уделено недостаточно внимания.

Целью данной статьи является разработка имитационных моделей СЭП ферросплавных печей и компонентов алгоритмического и программного обеспечения в среде Matlab/Simulink для исследования стационарных и динамических режимов их работы. В общем виде такая модель должна отражать основные энергетические процессы, протекающие в ферросплавной печи и позволять оценивать влияние на ход этих процессов параметров их СЭП. В модель печи должна быть включена подмодель электрической дуги, позволяющая определять протекающие в дуге термодинамические и электродинамические процессы и производить анализ распределения электроэнергии в ванне печи.

В данной работе в качестве объектов моделирования приняты наиболее распространенные СЭП трехэлектродных ферросплавных печей, состоящие из трех однофазных электропечных трансформаторных агрегатов, каждый из которых выполнен в виде двух электромагнитных единиц- главного и вольтодобавочного трансформаторов, причем в цепь последнего включена конденсаторная батарея продольной компенсации реактивной мощности (УПК). В таких СЭП как правило обмотки ВН и НН ЭПТ соединяются в «треугольник», причем соединение обмоток НН в «треугольник» осуществляется на электродах печи. Для поддержания электрического режима печей в заданных параметрах электропечные трансформаторы оснащаются устройствами регулирования напряжения под нагрузкой (РПН).

Предложенная модель СЭП представляет собой электрическую цепь, включающую электропечные трансформаторы, вторичный токоподвод (короткую сеть), электроды и ванну печи. При этом предполагается, что технологический процесс является непрерывным, а режим работы печи стационарным с четкими границами тепловых зон и квазистационарным характером протекания процессов в зонах. Электрическая цепь короткой сети и электродов печи представляется совокупностью линейных активно-

индуктивных сопротивлений, при этом электромагнитная связь между фазами короткой сети не учитывается. Подэлектродные рабочие зоны печи представляются в виде последовательного соединения сопротивлений области электрической дуги и области расплава, а также шунтирующим дугу и расплав сопротивлением области шихтовой проводимости, а электрическая дуга учитывается динамическим активным сопротивлением. При построении имитационной модели СЭП в Matlab/Simulink использовались существующие блоки электромагнитных элементов из библиотеки SimPowerSystems, а имитационная модель ферросплавной печи разрабатывалась на основе математической модели электрической цепи с шунтированной дугой переменного тока, которую можно записать в следующем виде [7,8]:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{\text{сэп}i}(t) = i_{\text{э}i} r_{\text{к}i} + L_{\text{к}i} \frac{di_{\text{э}i}}{dt} + i_{\text{д}i} r_{\text{д}i}(t) + i_{\text{д}i} r_{\text{р}i} + u_0; \\ u_{\text{сэп}i}(t) = i_{\text{э}i} r_{\text{к}i} + L_{\text{к}i} \frac{di_{\text{э}i}}{dt} + i_{\text{ш}i} r_{\text{ш}i} + u_0; \\ i_{\text{э}i} = i_{\text{ш}i} + i_{\text{д}i}; \\ \sum_{i=1}^3 i_{\text{э}i} = 0, \end{array} \right.$$

где  $u_{\text{сэп}i}(t)$ - выходное напряжение СЭП, подводимое к печи;

$i_{\text{э}i}, i_{\text{д}i}, i_{\text{ш}i}$  – токи, проходящие по электроду, дуге и шихте;

$r_{\text{к}i}, L_{\text{к}i}$ - активное сопротивление потерь и индуктивность ванны печи;

$r_{\text{р}i}, r_{\text{ш}i}$ - внутриваночные сопротивления расплава и шихты.

$r_{\text{д}i}(t)$  -динамическое сопротивление дугового разряда.

$u_0$ - мгновенное значение напряжения между нулевыми точками печи и печного трансформатора.

$i = 1, 2, 3$  – номер фазной цепи.

Параметры сопротивлений шихты и расплава определялись по методикам, приведенным в [9]. Для определения динамического сопротивления дугового разряда нами была усовершенствована математическая модель дуги, основанная на численно-аналитическом решении уравнения баланса энергии столба дуги. Данная модель будет представлена авторами в последующих работах. Процедура совместного решения модели электрической дуги переменного тока в среде Matlab/Simulink основана на том, что в каждом временном шаге вычисляемое значение  $r_{\text{д}i}$  вставляется в данное уравнение цепи и далее простой итерацией

получается зависимость  $i_{д}(t)$ , а также временные зависимости других вычисляемых параметров.

Предложенная модель СЭП ферросплавных печей показана на рис. 1. Для удобства восприятия модели пиктограммы блоков резистора и индуктивности в библиотеке SimPowerSystems изменены в соответствии с условными графическими обозначениями этих элементов, принятых в СНГ. Эти и другие полезные советы по моделированию в системе Matlab приведены на сайте [matlab.exponenta.ru](http://matlab.exponenta.ru).

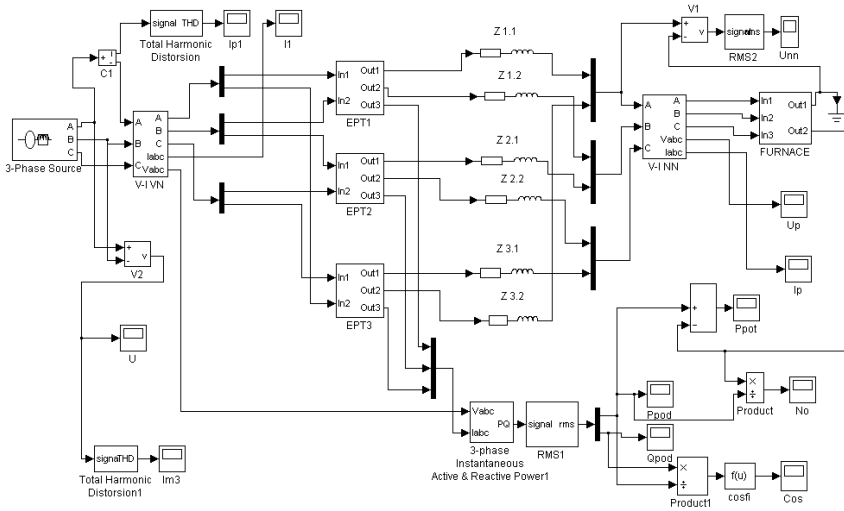


Рис. 1. Структурная схема имитационной модели системы электропитания ферросплавной печи

Структура этой модели включает следующие компоненты:

блок 3-Phase Source, включающий источник напряжения и последовательное активно-индуктивное сопротивление системы внешнего электроснабжения;

подмодели EPT 1...3, которые моделируют электропечные трансформаторные агрегаты с УПК (блоки Saturable transformer и Series RLC Branch) (рис. 2);

блоки Z1.1-Z3.2 (Series RLC Branch) определяющие собой активно-индуктивные сопротивления короткой сети от каждого трансформатора;

подмодель ферросплавной печи FURNACE (рис. 3), включающая подмодели подэлектродных областей E1...3 (рис. 4), которые в свою очередь содержат сопротивления каждого электрода Z1-Z3, шихтовой области  $r_{ш}$  и

области расплава  $r_p$  (блоки Series RLC Branch), а также модели дуги, выполненные в виде подмоделей ARC1...3.

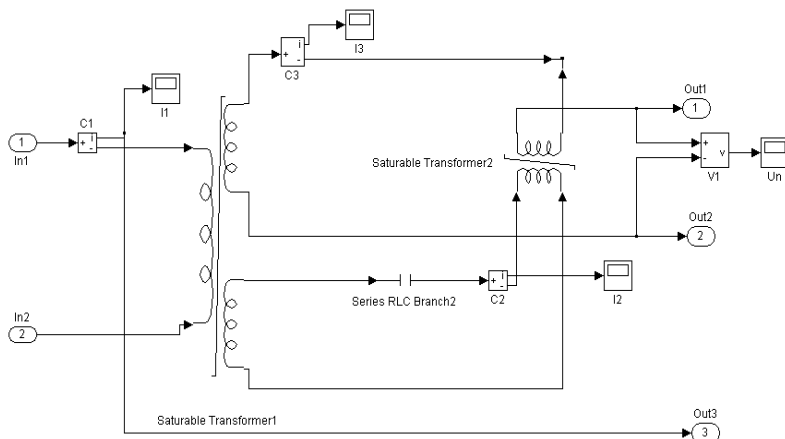


Рис. 2. Структурная схема подмодели ЕРТ

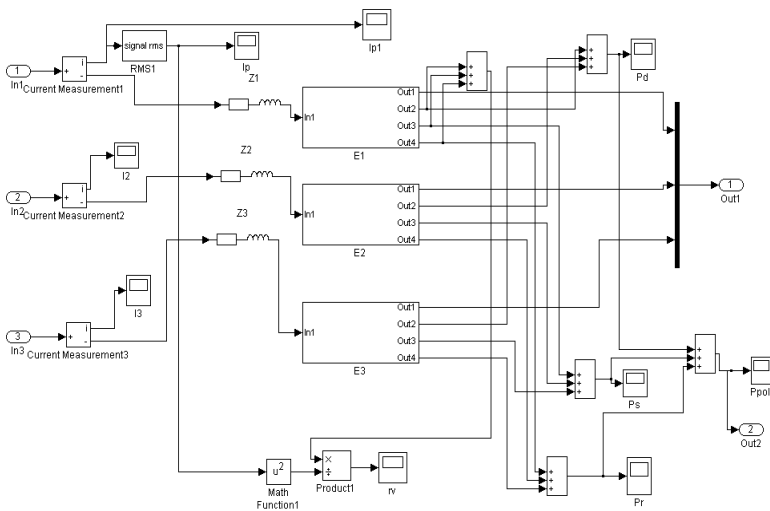


Рис. 3. Структурная схема подмодели FURNACE

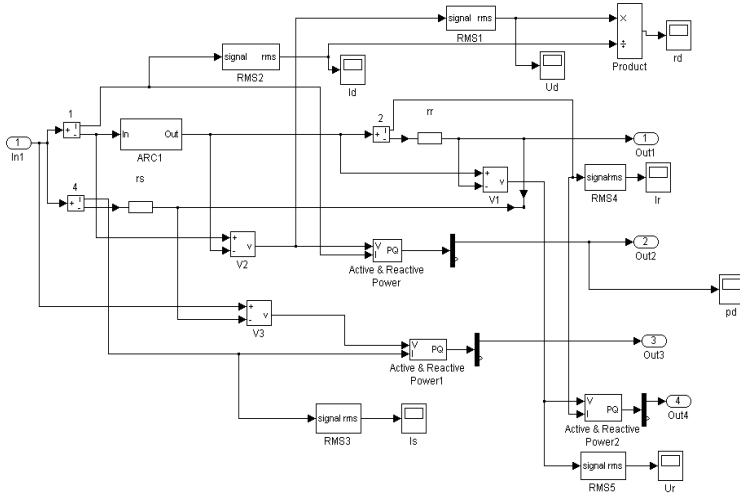


Рис. 4. Структурная схема подмодели подэлектродного пространства E

Имитационная модель дуги переменного тока выполнена нами в виде нелинейного элемента электрической цепи (рис. 5). Структурная схема модели включает управляемый источник тока (Controlled Current Source), к которому подключен измеритель напряжения на дуговом промежутке VD (Voltage Measurement). Между выходом измерителя напряжения и входом источника тока включены математические модели (блоки Fcn), реализующие динамическую вольтамперную характеристику дугового разряда и определяющие его тепловые, электрические и геометрические характеристики. Параметры этих блоков определялись на основании вышеупомянутой математической модели дуги. Тепловая инерционность дуги учитывалась блоком (Variable transport Delay), который определяет необходимое запаздывание кривой температуры дуги относительно кривой ее напряжения. Параметры запаздывания были рассчитаны нами с учетом экспериментальных данных [10], на основании которых получена зависимость угла зажигания дуги от напряжения на ней в виде экспоненциальной функции, вводимой в модель в блоке  $t_z$  (Fcn).

Параллельно источнику тока (Controlled Current Source) также подключен развязывающий резистор R, к зажимам которого подключены входной и выходной порты данной подмодели.

Следует отметить, что важным этапом моделирования электромагнитных процессов в СЭП является выбор метода численного интегрирования. В нашем случае наиболее эффективным выявился многошаговый двухэтапный метод ode 23tb (Stiff/TR-BDF2), основанный на неявной формуле Рунге-

Кутта, который обеспечивает устойчивость вычислительного процесса при необходимом уровне точности результата.

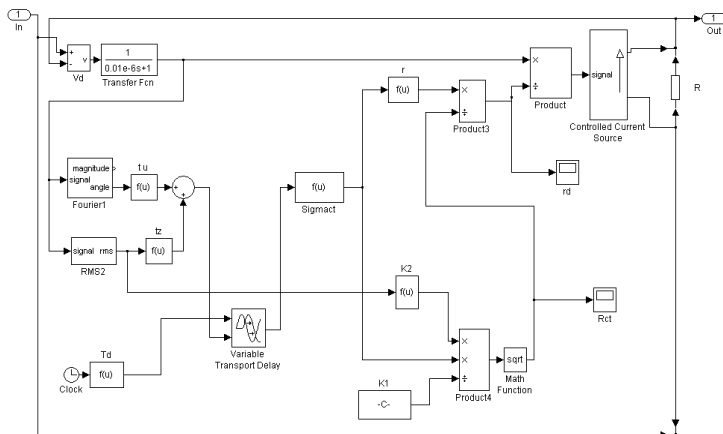
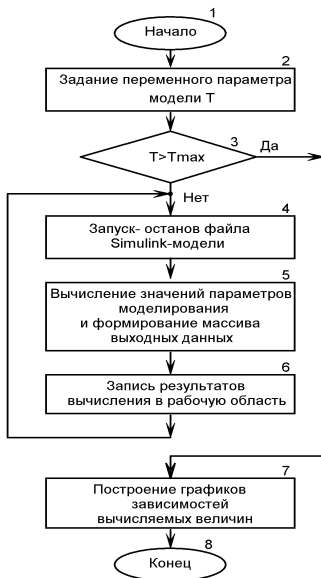


Рис. 5. Структурная схема подмодели дуги переменного тока ARC

При проведении анализа электромагнитных процессов в СЭП производится расчет и анализ большого массива числовых данных, а также построение зависимостей различных величин. Эту задачу в пакете Matlab можно решить с помощью М-сценария, оформляемого в виде специального программного модуля. Разработанная с учетом работ [5, 6] блок-схема алгоритма такого программного модуля, приведена на рис. 6 а. На рисунке 6 б в качестве примера приведен фрагмент текста программного модуля для расчета электрических характеристик СЭП с учетом параметров электрических дуг. Во втором блоке приведенного алгоритма задается переменный параметр модели  $T$ , диапазон и шаг изменения которого определяется в следующем блоке. Четвертый блок осуществляет циклический запуск файла имитационной модели, каждый раз с различными значениями  $T$ . В пятом блоке осуществляется выбор и расчет необходимых (действующих, максимальных и др.) значений параметров моделирования, а также формирование массива выходных данных. Далее осуществляется запись результатов моделирования в рабочую область программы (блок 6). В блоке 7 выполняется визуализация зависимостей расчетных величин в виде формирования графиков.

Приведенный на рис. 6 а алгоритм является универсальным, по которому могут составляться программные модули для исследования различных процессов в СЭП. При этом переменным параметром модели  $T$  может быть подводимое напряжение, сопротивление элементов СЭП и др.



а)

```

clc
clear
i=1
for T=0.01:0.1:1.2
    sim SEP
    %Вычисление радиуса столба дуги
    j=3000
    size(Rs)
    n=ans(:,1)
    P=[Rs(j:n,1),Rs(j:n,2)]
    Rm=0.00001
    h=n-j
    for ii=1:h
        P(ii:ii,2)
        if Rm<ans
            Rm=ans
            Rmax(i)=Rm
        end
    end
    % Вычисление подводимой мощности
    size(Ppod)
    m8=ans(:,1)
    P_pod(i)=Ppod(m8:m8,2)
    . . .
i=i+1
end
plot(U_nn,P_pol/27e6,U_rm,I_p/15e5,
U_rm,C_o,U_nn,N_o)

```

б)

Рис. 6. а) - блок-схема программного модуля для расчета электромагнитных процессов, б) –фрагмент текста программного модуля

Для апробации модели и решения ряда практических задач, связанных с выбором рациональных электрических режимов СЭП с учетом распределения электрической мощности в подэлектродных рабочих зонах, нами произведено моделирование электромагнитных процессов в СЭП ферросплавных печей ОКБ-613 мощностью 27 МВА с электропечными трансформаторами ЭОЦНК-21000/10. Параметры схемы замещения ванны печи, вводимые в модель, были рассчитаны для условий выплавки кремния или высокопроцентных марок ферросилиция. На рис. 7 представлены моделируемые временные зависимости тока и напряжения печи, а на рис. 8 приведены электрические характеристики СЭП при регулировании выходного напряжения электропечными трансформаторами. При проведении данных расчетов сопротивления  $r_{pi}$ ,  $r_{ши}$  принимались условно постоянными.

Как видно, кривые тока и напряжения печи несколько отличаются от синусоидальных. Это обусловлено тем, что при принятых условиях моделирования суммарная мощность дугового разряда в печи составляет ~ 50% от всей мощности СЭП  $P_{с\text{эп}}$ . С увеличением напряжения  $U_{с\text{эп}}$  общая подводимая мощность  $P_{с\text{эп}}$  увеличивается, а КПД и  $\cos\phi$  снижаются. При этом

большая часть мощности печи перераспределяется из зоны шихты в зону дуги и расплава. Причиной указанных особенностей является нелинейность электрической дуги, сопротивление которой ( $r_d$ ) с ростом напряжения уменьшается, а рост тока дуги происходит за счет увеличения радиуса ее токопроводящего канала  $R_d$ . Полученные результаты моделирования достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными [7, 8].

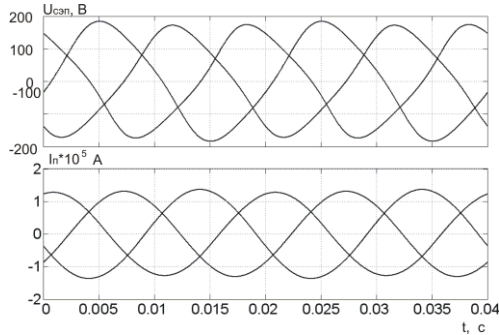


Рис. 7. Моделируемые временные зависимости тока и напряжения ферросплавной печи

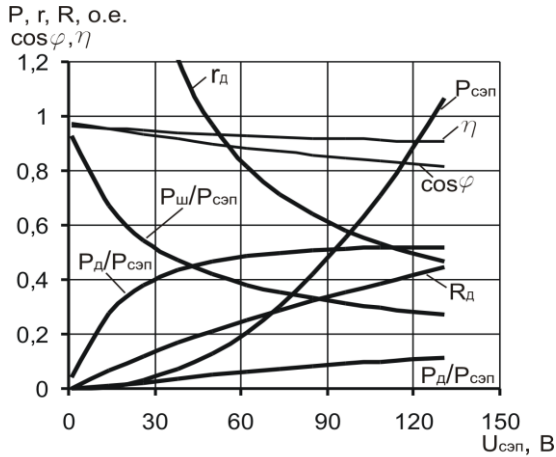


Рис. 8. Электрические характеристики СЭП ферросплавных печей при регулировании напряжения электропечными трансформаторами

Таким образом, полученные модели позволяют оперативно получать информацию о параметрах ферросплавных печей и их СЭП, что весьма важно при их эксплуатации. Приведенные модели с некоторой модификацией также использовались нами для исследования коммутационных процессов в



электropечных трансформаторах [11], при этом отмечена приемлемая сходимость результатов моделирования и экспериментальных данных.

**Выводы.** Разработанная имитационная модель СЭП ферросплавных печей позволяет производить расчеты стационарных и динамических, симметричных и несимметричных режимов СЭП, с учетом энергетических процессов, протекающих в ваннах ферросплавных печей, что позволяет оперативно корректировать их электрические режимы с целью достижения наилучших технико-экономических показателей. Использование предложенного алгоритмического и программного обеспечения позволяет значительно повысить эффективность вычислительной процедуры, а также сократить временные затраты. Уточнены расчетные характеристики СЭП ферросплавных печей с учетом распределения электроэнергии в их подэлектродных рабочих зонах в зависимости от уровня выходного напряжения СЭП. На основе предложенных моделей были усовершенствованы методики расчета электрических режимов СЭП ферросплавных печей, которые применяются на ОАО «Стахановском заводе ферросплавов». При этом представляется перспективным использование полученных моделей в составе АСУТП для выплавки ферросилиция.

**Список литературы:** 1. Гасик М. И., Ганцеровский О. Г., Овчарук А. М., Рогачев И. П. Ферросплавы Украины-2000.-Днепропетровск: «Системные технологии», 2001 г. -143 с. 2. Воробьев В. П., Сивцов А. В. Строеение рабочего пространства и схемы замещения полезной электрической нагрузки ферросплавных печей. В кн.: Компьютерное моделирование оптимизация технологических процессов электротермических производств. Сб. трудов научно-технического совещания «Электротермия -2000». Под ред. Удалова Ю. П. СПбГТИ(ТУ). СПб., 2000 г. с. 227-232. 3. Арменский С. В. Разработка математической модели подэлектродного пространства руднотермических печей. Дис.... канд. техн. наук: 05.13.18. – Новосибирск, 2002 г.- 379 с. 4. Данцис Я. Б., Жилов Г. М. Емкостная компенсация реактивных нагрузок мощных токоприемников промышленных предприятий.- Л.: Энергия, 1980-176 с. 5. Халиков В. А., Паханьян В. М., Шатан О. Ф. Имитационное моделирование и коррекция вольтамперных характеристик источников тока сварочной дуги//Техническая электродинамика. -2006. №3. с. 18-25. 6. Халиков В. А., Можаровский А. Г. Методология применения программного пакета MATLAB при моделировании и исследовании электромагнитных процессов в трансформаторно-ключевых исполнительных структурах. -К.: ИЭД НАНУ, 2001.- 45 с. 7. Saevarsdottir G. A., Larsen H. L., Bakken J. A. High-power ac arcs in metallurgical furnaces// High Temp. Material Processes, 2001. vol. 5, №1, p.21-43. 8. Сисоян Г. А. Электрическая дуга в электрической печи. - М.: Металлургия, 1974.-304 с. 9. Кулинич В. И., Головачев Н. П., Суслов А. В., Привалов О. Е. Репродукция электрического режима выплавки углеродистого феррохрома по составляющим активного сопротивления ванны//Сталь 2007 г. №7 с.-41-46. 10. Миронов Ю. М., Ильгачев А. Н., Крайнов И. Б. Особенности электрических режимов мощных фосфорных печей.//Электричество 1998 г, №7 с. 52-55. 11. Кухарев А. Л., Кохан П. Г., Недвига Л. А. Коммутационные процессы в реакторных устройствах РПН электropечных трансформаторов//Техническая электродинамика, 2006. № 5. с. 38-43.

*Поступила в редколлегию 04.04.07*

***В.И. БОРОДИН***

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИГОДНОСТИ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ  
ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ  
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ДВУХУРОВНЕВЫХ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЕМ ТЕРРИТОРИИ**

У статті розглядаються питання оцінки придатності імітаційної моделі для прогнозування наслідків функціонування двохрівневих систем управління розвитком території. Пропонується методика дослідження меж застосування імітаційної моделі для прогнозування наслідків управляючих впливів на процеси розвитку в багаторівневих територіальних системах.

**Введение.** Как объект целенаправленного анализа и прогнозирования мировая система предстает, в первую очередь, как совокупность взаимосвязанных регионально-страновых подсистем, каждая из которых в свою очередь представляет внутренне структурированную сложную систему [1]. В рамках каждой подсистемы мировой системы национальные хозяйства относительно обособлены: национальные территориальные системы обладают общими и специфическими особенностями, определяющими место и роль каждой страны в международном разделении труда. Поэтому мировое хозяйство в целом представляется как многоуровневое образование, в котором первый уровень – мировая система в целом, второй уровень – основные подсистемы мировой системы, промежуточные уровни – различные группировки стран (например, развитые страны Европы, страны ОПЕК, и т.д.) следующие уровни – отдельные государства, регионы, области и т.д. [1].

Таким образом, в многоуровневой территориальной системе (ТС) можно выделить следующие типы ТС и соответствующие им системы управления развитием территории (СУРТ):

- мировая ТС (Мировая система). Управление развитием территории осуществляется на основе мирового механизма рыночной регуляции (МРР);
- национальные содружества (региональные ТС). Мировой и региональные МРР;
- национальная ТС. СУРТ содержит взаимодействующие механизм государственного управления (МГУ) и национальный МРР;
- региональная, областная, районная, городская ТС. СУРТ содержит взаимодействующие МРР, механизмы самоуправления и МГУ.

Понятие многоуровневой ТС имеет ряд существенных характеристик, присущих всем иерархическим системам. К ним относятся: последовательное вертикальное расположение подсистем, составляющих данную систему

(вертикальная декомпозиция); приоритет действий или право вмешательства подсистем верхнего уровня; зависимость действий подсистем верхнего уровня от фактического исполнения нижними уровнями своих функций [2].

При переходе Украины на траекторию устойчивого развития необходимо иметь в виду, что как бы ни были малы темпы роста основных макроэкономических показателей, характеризующих развитие национальной территориальной системы, рано или поздно должен появиться эффект от того, что этот рост происходит в ограниченной по объему к ресурсам среде обитания. Несмотря на то, что ряд ограничений могут быть ослаблены в процессе развития науки, производительных сил общества, структурных преобразований, нельзя с учетом сложности и масштабности современных процессов взаимодействия человека и природной среды пассивно надеяться на их стихийную адаптацию к желательному состоянию. Необходимо общегосударственная стратегия устойчивого развития страны в целом и каждого из ее регионов. Развитие механизма государственного управления и рыночного регулирования, усиление полномочий местной власти, требует координации со стороны Центра процессов территориального развития государства, наличия инструментов прогнозирования последствий функционирования СУРТ отдельных регионов и страны в целом.

В связи с этим актуальным является осуществление достоверного прогнозирования последствий функционирования СУРТ на разных уровнях многоуровневой ТС, содержащей объект управления (экономическая, экологическая, социальная сферы) и управляющую сферу, интегрирующую в себе развитые, взаимодействующие механизмы стихийной регуляции и осознанного управления процессами направляемого развития ТС. Это требует создания технологии исследования пригодности имитационной модели (ИМ) для прогнозирования последствий функционирования двухуровневых СУРТ являющихся типовым фрагментом многоуровневых СУРТ.

**Постановка задачи.** Рассматриваемая целенаправленная ТС, представляет собой совокупность сферы производства, сферы потребления, экологической сферы, сферы управления, образующих некоторую структуру, предназначенную в пределах некоторой выделенной территории  $S$  для производства, обмена, распределения, потребления товаров и услуг, для регулирования этих функций с целью обеспечения при минимальных потерях общества, без нарушения действующих социальных, экологических ограничений максимального удовлетворения растущих потребностей широких слоев населения [3]. Для ТС задано разбиение  $T_0(S) = \{S_j, j = \overline{1, H}\}$  ее территории  $S$  на регионы с территориями  $S_j$ , которое определяет двухуровневую структуру ТС (рис. 1). Задано разбиение  $T_1$  множества  $T_0(S)$ ,

$T_1(T_0) = \left\{ T'_i : T'_i \subset T_0, T'_i \cap T'_\mu = \emptyset, i \neq \mu, \bigcup_i T'_i = T_0 \right\}$ , которое порождает

семейство макрорегионов с территориями  $S^i = \bigcup_{S_j \in T_0^i} S_j$ ,  $i = \overline{1, H_1}$ ,  $H_1$  – число макрорегионов.

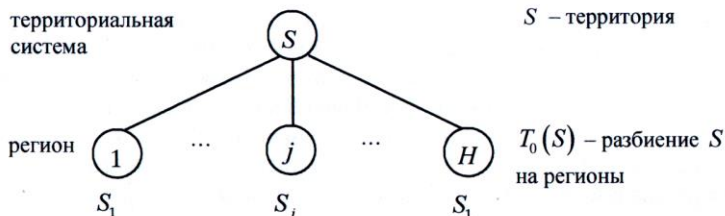


Рис. 1. Двухуровневая структура ТС

Разбиения  $T_0, T_1$  порождают трехуровневую структуру ТС (рис. 2).

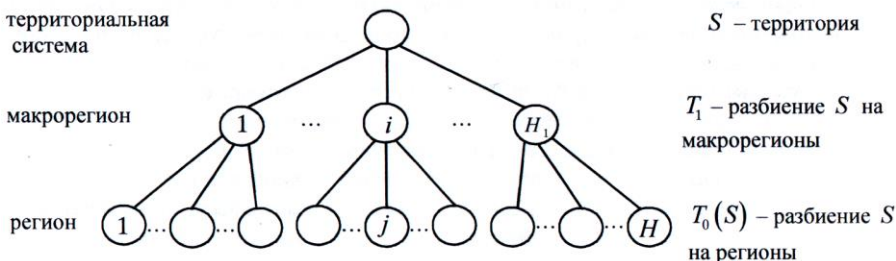


Рис. 2. Трехуровневая структура ТС

Предполагается, что для автоматизированного управления устойчивым развитием ТС на каждом ее уровне, в каждом узле существует автоматизированная система управления устойчивым развитием территории (АСУУРТ). Взаимодействие АСУУРТ нижнего уровня в каждой двухуровневой подсистеме интегрированной АСУУРТ верхнего уровня представлено на рис. 3. В двухуровневой ТС каждый регион имеет автономную систему управления процессами его функционирования и развития. Интегрированная АСУ верхнего уровня, осуществляя координацию функционирования АСУ нижнего уровня, обеспечивает управление устойчивым развитием территории в направлении ее целевого состояния [4].

Представленная на рис. 3 двухуровневая АСУУРТ должна в каждой  $TC_j, j = \overline{1, k}$  обеспечивать выполнение требований экологической безопасности общества, уточнение видения желаемого будущего, корректировку параметров целевого состояния (ЦС), контуров стратегии устойчивого развития, формирование допустимых эффективных управлений

по своевременной реализации её первоочередных этапов [4]. Обеспечение указанных требований в каждой РАСУУРТ, ИАСУУРТ невозможно без организации информационно-аналитической поддержки с использованием системы поддержки принятия решений (СППР) по управлению процессами развития.

Модули ЦД, ИД (рис. 3) имитируют стихийные механизмы регулирования процессов функционирования и развития ТС. Основу модуля ЦД образует идеальная модель циклической динамики [4]. Основу модуля ИД образует динамическая модель развития территории [5]. Основу модуля ПСР составляют механизмы саморегулирования процессов развития территории.

Системная интеграция механизмов рыночной и государственной регуляции предполагает применение адекватных методов, технологий пошагового регулирования процессов направляемого территориального развития, позволяющих ТС в сложных условиях, когда трудно представить конечный результат развития, двигаться в ЦС осторожно и осмотрительно, контролируя и прогнозируя возможные потери общества, эффективно используя преимущества рыночных и государственных регуляторов.

Функционирование системы управления каждого региона, всей территории (рис. 2) отражается отдельной ИМ. Для прогнозирования последствий управляющих воздействий на процессы развития в автономной АСУУРТ используется ИМ, в основу, которой положена модифицированная модель Дж. Форрестера. В данной модели взаимосвязаны население, фонды, географическое пространство, природные ресурсы, загрязнение, географическое пространство, природные ресурсы, загрязнение, производство продуктов питания [6].

Территория, как сложная, открытая, динамическая система, определяется совокупностью различных, взаимодействующих процессов – процессов изменения демографической ситуации, накопления и выбытия фондов, истощения невозобновляемых природных ресурсов, загрязнения и очистки окружающей природной среды, производства и потребления продуктов питания и интеллектуальной продукции, процессов накопления и выбытия интегрального интеллекта общества и др.

При моделировании ТС представлена в виде единой замкнутой системы, в которой замкнутость является упрощающим предположением, и реальное внешнее воздействие на ТС учитывается во время настройки модели.

В соответствии с концепцией мировой динамики в данной модели в качестве переменных состояния (уровней) прогнозной модели развития ТС выбраны:  $y_1$  – численность населения,  $y_2$  – оценка величины природных ресурсов,  $y_3$  – оценка величины фондов,  $y_4$  – относительная величина загрязнения природной среды,  $y_5$  – относительная часть фондов, используемых в сельском хозяйстве,  $y_6$  – интегральная оценка интеллекта

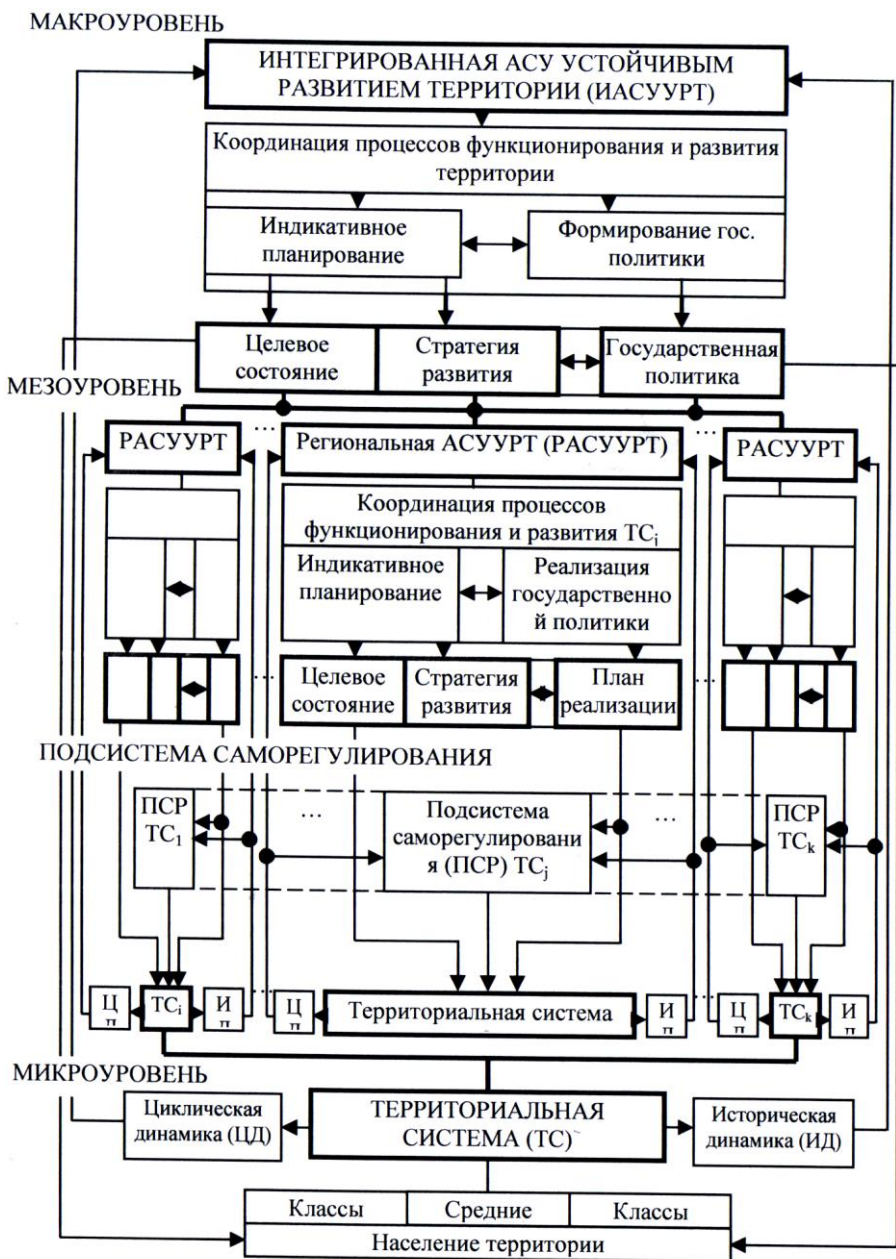


Рис. 3. Взаимодействие АСУУРТ в двухуровневой интегрированной системе управления устойчивым развитием ТС

общества,  $y_7$  – оценка части интеллекта, используемой в сельскохозяйственной сфере,  $y_8$  – валовый внутренний продукт. Изменение вектора состояния  $y(t) = (y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6, y_7, y_8)$  от одного рассматриваемого периода  $t_k$  к другому  $t_{k+1}$  определяется системой конечно-разностных уравнений вида [5]:

$$y(t_{k+1}) = y(t_k) + h \times B(x, y(t_k)) \times e$$

с начальными условиями  $y_i(t_0) = y_{i0}$ , где  $h$  – длина временного шага, равная периоду времени между моментами  $t(k+1)$  и  $t(k)$ ,  $B$  – диагональная матрица темпов прироста переменных состояния,  $e = (1, 1, \dots, 1)$ ,  $x$  – вектор параметров модели, задаваемых нелинейными зависимостями вида:

$$x = f ( f_j (x), F_m(x), K_s),$$

где  $K_s$  – настроечные коэффициенты,  $f_j(x)$  – непрерывные нелинейные функции, отражающие объективно существующие зависимости между реальными параметрами используемой модели,  $F_m(x)$  – логические функции, используемые в качестве временных переключателей для измерения характера вариации параметра  $x$ .

Выбор в качестве математического инструментария конечно-разностных уравнений как дискретного аналога дифференциальных уравнений объясняется тем, что природа статистической информации носит дискретный характер, т.е. данные формируются за временные интервалы с дискретностью в один год. Поэтому вычисление прогнозируемых значений переменных для каждого  $k+1$  года производится на основе значений данных за  $k$ -й и предыдущие годы с той же дискретностью.

Для оценки пригодности ИМ для прогнозирования последствий функционирования двухуровневых СУРТ используются два критерия: в какой степени расчетные величины системных переменных совпадают с известными ретроспективными данными и насколько точны предсказания на основе ИМ относительно поведения реальной двухуровневой системы в будущем. Первый критерий используется при настройке ИМ на отдельный регион и на ТС в целом. Второй критерий используется для оценки достоверности и непротиворечивости прогноза.

Исследование пригодности ИМ для прогнозирования последствий функционирования двухуровневых СУРТ, предполагает проведение машинных экспериментов с имитационными моделями, в процессе которых возникает проблема вычисления критерия, указывающего, когда траектории, построенные при помощи машинной имитационной модели, совпадают с наблюдаемыми или наблюдавшимися траекториями так, чтобы это совпадение нельзя было считать просто случайным. В данном случае необходимо, чтобы траектории  $P_i, i = \overline{1, 8}$  глобальных прогнозов ТС верхнего

уровня совпадали с траекториями  $A_i, i = \overline{1,8}$  агрегированного прогноза,  $A_i = \sum_{j=1}^{H_i} A_{ij}$ , семейства структурных элементов нижнего уровня, где  $A_{ij}$  – траектория локального прогноза ТС нижнего уровня двухуровневой ТС. Оценка пригодности ИМ может осуществляться на основе дисперсионного анализа, критерия  $\chi^2$ , факторного анализа, критерия Колмогорова–Смирнова, регрессионного анализа, коэффициента несоответствия прогнозов Тейла  $\nu$  и т.д.

Одним из наиболее эффективных и удобных в применении является коэффициент несоответствия прогнозов Тейла [7], который и предлагается для исследования применимости ИМ при прогнозировании последствий функционирования двухуровневых СУРТ.

$$\nu = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^8 \sum_{t=1}^T (\tilde{P}_{it} - \tilde{A}_{it})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^8 \sum_{t=1}^T (\tilde{P}_{it}^2) + \sum_{i=1}^8 \sum_{t=1}^T (\tilde{A}_{it}^2)}}, \quad (1)$$

где:

$$\tilde{P}_{it} = \frac{P_{it}}{\max_i \{A_{it}, P_{it}\}}, \quad \tilde{A}_{it} = \frac{A_{it}}{\max_i \{A_{it}, P_{it}\}},$$

$i$  – индекс системной переменной,  $i = \overline{1,8}$ ,  $t$  – индекс года прогнозирования,  $t = \overline{1, T}$ ,  $T$  – число лет в прогнозном временном интервале,  $\tilde{P}_{it}$  – нормированное прогнозное значение  $i$ -ой системной переменной для ТС верхнего уровня,  $\tilde{A}_{it}$  – нормированное агрегированное прогнозное значение  $i$ -ой системной переменной для семейства ТС нижнего уровня.

Если  $\nu$  не превосходит заданного порога  $\varepsilon$ , то ИМ считают пригодной. В противном случае повторяют процесс настройки ИМ каждой ТС нижнего уровня и ТС в целом.

Ставится задача разработки с использованием  $\nu$  методики исследования пригодности ИМ при прогнозировании последствий функционирования двухуровневых СУРТ.

**Алгоритм решения задачи.** Алгоритм исследования пригодности ИМ на разных уровнях двухуровневой ТС содержит следующие этапы:

16. Задание стратегических целей ТС верхнего уровня;
17. Задание разбиения территории  $T_0$ , определяющего территориальное устройство ТС, а также число и границы регионов;



18. Задание институциональной структуры АСУ территориальным развитием;
19. Формирование административно-территориального устройства (АТУ) территориальной системы;
20. Настройка и долгосрочное прогнозирование на основе имитационной модели траекторий  $A_j$ ,  $i = \overline{1,8}$ , всех отдельных регионов  $j$ ,  $j = \overline{1, H_1}$ , определяемых заданным АТУ территориальной системы;
21. Долгосрочный прогноз социально-экономического развития ТС на основе семейства построенных прогнозов  $A_j$ ,  $A_i = \sum_{j=1}^{H_1} A_{ij}$ ,  $i = \overline{1,8}$ ;
22. Настройка и долгосрочное прогнозирование на основе имитационной модели траекторий  $P_i$ ,  $i = \overline{1,8}$  ТС, как унитарного целого;
23. Анализ разрывов между прогнозами развития, полученными на этапе 7 и стратегическими целями государства. Если разрывы в допустимых пределах, переходят к этапу 9. Иначе переходят к этапу 10.
24. Вычисление  $\nu$  согласно (1). Если параметр  $\nu$  не больше  $\varepsilon$ , то процесс оценки пригодности ИМ для всех элементов двухуровневой ТС заканчивается. Если нет, то переходят к этапу 3. Описанный процесс продолжается до тех пор, пока не станет ясно, что применение ИМ для моделирования развития всех элементов ТС не возможно при заданных целевых установках;
25. Вывод о пригодности ИМ при прогнозировании последствий функционирования двухуровневых СУРТ на рассматриваемом уровне многоуровневой ТС. Если ИМ пригодна, но стратегические цели не достигаются, то ставят вопрос о возможности их корректировки и переходят к этапу 9. В противном случае к этапу 3.

Если в процессе исследования пригодности модели достичь компромисса не удастся, то рассматривают возможность изменения разбиения  $T_0$ , корректировки стратегических целей развития с учетом ограниченных ресурсных возможностей территориальной системы.

**Список литературы:** 1. *Дадаян В.С.* Моделирование глобальных экономических процессов. – М.: Экономика, 1984. – 323с. 2. *Месарович М.* Теория многоуровневых экономических систем. – М.: Наука, 1987. – 432с. 3. *Лисицкий В.Л.* Структурный анализ процессов развития территории // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ», – 2005. – №18. – С. 121-124. 4. Административно-территориальное устройство и устойчивое развитие региона (концептуальные основы и методология), Монография / *В.Н. Бабаев, Л.Л. Товажнянский и др.* – Харьков, НТУ «ХПИ», 2006. – 316с. 5. Долгосрочный прогноз социально-экономического развития Украины / *И.В. Кононенко, В.Л. Лисицкий, А.С. Пономарев, В.И. Алехин.* – Х., ТОВ «Хартія» 1999. – 176с. 6. *Форрестер Дж.* Мировая динамика. / Под ред. Д.М. Гвишиани, Н.Н. Моисеева, – М.: Наука, 1978. – 168с. 7. *Тейл Г.* Экономические прогнозы и принятие решений. – М.: Статистика, 1971. – 488с.

*Поступила в редколлегию 15.05.07*

*А. С. КУЦЕНКО*, д-р. техн. наук,  
*К. Н. ЯКИМЕНКО*  
*Э. Е. РУБИН*, канд. техн. наук

## **ГЕНЕРАТОР ДАННЫХ ДЛЯ СИСТЕМ ОЦЕНИВАНИЯ КАЧЕСТВА ОБРАЗОВАНИЯ**

В статті описується спосіб побудови генератора даних для різних систем, у тому числі для систем оцінювання якості освіти. Також виконана програмна реалізація генератора даних. Пропонується використання отриманого генератора для тестування алгоритмів обробки даних у системах оцінювання якості освіти

В статье описывается способ построения генератора данных для различных систем, в том числе для систем оценивания качества образования. Также выполнена программная реализация генератора данных. Предлагается использование полученного генератора для тестирования алгоритмов обработки данных в системах оценивания качества образования.

The article describes the development of a data generator for different systems, including systems of evaluation of education quality. Also a data generator has been implemented programmatically. The use of the generator is suggested for testing data processing algorithms in systems of evaluation of education quality.

**Введение.** В настоящее время система образования в Украине претерпевает значительные изменения. Такие факторы, как вхождение в Болонский процесс, процесс интеграции экономики Украины в европейскую экономическую систему и систему образования, переход от государственной плановой системы к рыночной, требуют обеспечения баланса между производством, наукой и образованием. В данном списке образование является основой и имеет особое значение.

Реализация грамотного подхода к формированию процесса образования невозможна без широкого применения как математических методов, так и современных информационных технологий.

Одной из основных задач, возникающих в образовательном процессе является задача классификации выпускников по их экзаменационным оценкам. В работах [1, 2, 3] предложен подход к решению этой задачи на основе информационных показателей. Такой подход оказался весьма перспективным, поскольку наряду с классификацией выпускников появилась возможность оценивать связность дисциплин, изучаемых по программе специальности.

В последние годы специалисты для исследования поведения сложных систем стали чаще использовать имитацию на вычислительной машине. Диапазон применения имитации на ЭВМ в настоящее время очень велик. В том числе имитацию можно применить для тестирования алгоритмов группировки данных в системах оценивания качества обучения.

### Постановка задачи

Сформировать матрицу наблюдений  $X = [x_{ij}]_{m \times N}$  над множеством из  $N$  параметров, которые по степени связи образуют  $K$  групп мощности таких, что степень связи между параметрами, входящими в одну группу и в различные группы, определяется некоторыми варьируемыми величинами.

Будем интерпретировать экзаменационные оценки как случайные величины, каждая из которых имеет  $m$  реализаций, записанных в соответствующем столбце матрицы наблюдений. Тогда для решения поставленной задачи можно воспользоваться следующей схемой:

1. Осуществить случайное упорядочение параметров внутри множества.
2. Случайным образом получить  $K$   $m$ -мерных некоррелированных векторов  $X_k^0$ ,  $k = \overline{1, K}$ , принимаемых за прообразы групп.
3. По прообразам построить  $K$  групп параметров с заданной степенью связи каждого из них с прообразом их групп.

Существенным моментом при тестировании алгоритмов группировки параметров является оценка качества полученного разбиения и сопоставление его с генерировавшимся.

### Метод решения задачи

В соответствии с информационным подходом к процессу образования исходные данные имеют вид матрицы наблюдений, элементы которой являются качественными показателями успеваемости  $i$ -го студента по  $j$ -й дисциплине в соответствии с выбранной системой баллов. Каждая строка матрицы  $X$  рассматривается как  $N$ -мерный случайный вектор с нормальным законом распределения, характеризующийся вектором математических ожиданий  $\mu$  и ковариационной матрицей  $V$ .

Для реализации генератора случайных векторов, компоненты которых удовлетворяют условиям блочности необходимо задать ковариационную матрицу  $V$  с высокой степенью связи между компонентами, входящими в один блок, и малой – между компонентами из различных блоков. Ковариационная матрица с указанными свойствами может быть получена на основании соответствующей корреляционной матрицы блочной структуры  $R = (R)_{i,j}$ ,  $i, j = \overline{1, K}$ . Каждый элемент  $r$  блоков  $R_{ii}$ , расположенных на главной диагонали, удовлетворяет условию

$$1 > \beta_1 \leq |r| \leq 1, \quad (1)$$

а блоков  $R_{jj}$  – условию

$$|r| \leq \beta_2 < 1. \quad (2)$$

Кроме того  $\beta_1 > \beta_2$ . Таким образом, числа  $\beta_1$  и  $\beta_2$ , принимающие значения в диапазоне  $[0,1]$ , задают степень связности дисциплин внутри блоков и между блоками: чем больше  $\beta_1$ , тем больше связи внутри блоков, чем меньше  $\beta_2$ , тем меньше связи между блоками.

Вторым условием на формирование матрицы  $R$  является требование ее положительной определенности. Для решения данной задачи воспользуемся основным критерием положительной определенности симметрической матрицы – критерием Сильвестра. В соответствии с последним, необходимым и достаточным условием положительной определенности симметрической матрицы является положительность ее главных диагональных миноров.

Ниже предложен рекуррентный алгоритм, позволяющий эффективно строить множество положительно определенных матриц. Обратим внимание на то, что каждый из миноров  $|R_k|$  получается в результате окаймления матрицы минора  $|R_{k-1}|$

$$\left( \begin{array}{c|c} R_{k-1} & r_k \\ \hline r_k^T & c_k \end{array} \right), k = \overline{2, N}, R_1 = 1 \quad (3)$$

где  $\dim R_k = k \times k$ ,  $\dim r_k = k - 1$ ,  $c_k$  – скаляр.

В соответствии с соотношениями для определителя блочной матрицы миноры  $|R_k|$  и  $|R_{k-1}|$  связаны соотношением:

$$|R_k| = |R_{k-1}| (c_k - r_k^T R_{k-1}^{-1} r_k). \quad (4)$$

Таким образом, если  $|R_{k-1}| > 0$ , то для выполнения условия  $|R_k| > 0$  необходимо и достаточно выполнения неравенства:

$$h_k = c_k - r_k^T R_{k-1}^{-1} r_k > 0. \quad (5)$$

Рекуррентные соотношения (4-5), а также условия, налагаемые на величины коэффициентов корреляции, позволяют построить эвристический алгоритм генерации ковариационной матрицы с заданной структурой ее коэффициентов.

При реализации данной методики следует учесть, что диагональные коэффициенты корреляционной матрицы  $R$  равны 1. Таким образом, в соотношениях (1) и (2)  $c_k = 1$  и  $R_1 = 1$ . Условие, налагаемое на выбор коэффициентов  $r_k$  в этом случае примет вид

$$r_k^T R_{k-1}^{-1} r_k < 1 \quad (6)$$

На каждом шаге окймления вектор  $r_k$  состоит из двух подвекторов  $\overline{r_k}$  и  $\underline{r_k}$ . Вектор  $\overline{r_k}$  покомпонентно удовлетворяет условию (1) а вектор  $\underline{r_k}$  – условию (2). Размерности  $\overline{r_k}$  и  $\underline{r_k}$  обусловлены выбранной структурой корреляционной матрицы  $R$ . Таким образом, последовательность матриц  $R_k$  получается путем генерирования последовательностей случайных векторов  $r_k = (\overline{r_k}, \underline{r_k})$ , пока не выполнится условие (6).

### Численные результаты

В системе MatLab был программно реализован генератор данных. Для генерации необходимо задать коэффициент связи внутри блока  $\beta_1$ , между блоками  $\beta_2$ , а также произвольное разбиение на блоки. В численном эксперименте генерировались матрицы для разных значений параметра  $\beta_1$ , приведенные к 100-бальной шкале. Данные генерировались для трех блоков по 5, 3 и 2 столбца. В качестве критерия оценки связи внутри блока полученных матриц было выбрано среднее значение разности минимального и максимального значений внутри каждого из блоков.

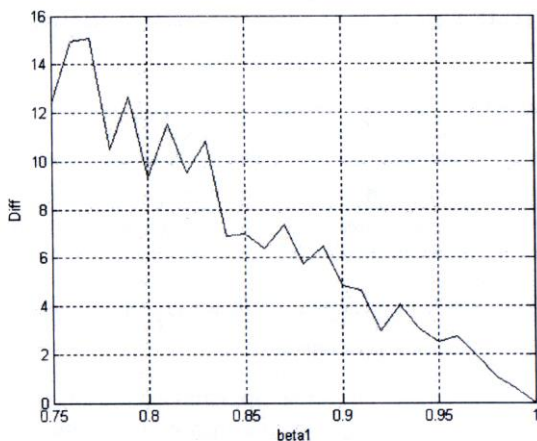


Рисунок 1. Зависимость разброса значений внутри блока от величины  $\beta_1$ .

Из Рисунка 1 видно, что при увеличении значения параметра  $\beta_1$  разброс значений внутри блока уменьшается, а при  $\beta_1 = 1$ , т.е. при максимальном значении параметра связи внутри блока, разброс равен 0.

Полученные результаты подтверждают адекватность модели и могут быть в дальнейшем использованы при анализе алгоритмов разбиения данных в системах оценивания качества обучения.

**Список литературы:** 1. Куценко А.С. Рубин Э.Е. Классификация выпускников высших учебных заведений на основе информационных показателей. // Вестник Национального технического университета «ХПИ» – Харьков: НТУ «ХПИ» – 2004. – №11. 2. Куценко А.С. Рубин Э.Е. Итерационные алгоритмы построения разбиения множества параметров на основе информационного показателя связи.–Харьков. – 2003. – №5. 3. Рубин Э.Е. Использование характерных параметров для построения алгоритмов группировки, основанных на разделении исходного множества.// Вестник Национального технического университета «ХПИ» – Харьков: НТУ «ХПИ» – 2003. – №18.

*Поступила в редакцию 13.05.07*

УДК 517.87:621.161.6

**А.С. КУЦЕНКО**, д-р тех наук, **А.В. БОЙКО**, студент НТУ «ХПИ»,  
**А.В. ЛИТВИН**, студент НТУ «ХПИ»

## **ГИБРИДНЫЕ СИСТЕМЫ АРХИВАЦИИ И ШИФРОВАНИЯ ДАННЫХ**

Разработана гибридная система архивации и шифрования данных. Представлена алгоритмическая реализация архивации данных. Представлена алгоритмическая реализация шифрования данных. Представлена целостная система обработки данных.

The hybrid system of archiving and enciphering of data is developed. Algorithmic realization of archiving of data is presented. Algorithmic realization of enciphering of data is presented. The complete system of data processing is presented.

Розроблена гібридна система архівації і шифрування даних. Представлена алгоритмічна реалізація архівації даних. Представлена алгоритмічна реалізація шифрування даних. Представлена цілісна система обробки даних.

**Введение.** Различные системы архивирования и шифрования данных применяются при передаче и хранении информационных блоков. Актуальна задача разработки единой системы, которая обеспечит оптимальную обработку информационных потоков. Применение единой системы обработки информации позволит сократить расходы на развертывание, поддержку и эксплуатацию конфиденциальных каналов связи.

**Постановка задачи.** Необходимо разработать гибридную систему архивации и шифрования данных.

**Реализация.** Для реализации шифрования данных был выбран алгоритм RC5, который обеспечивает высокую скорость обработки информации и

надежное качество шифрования. Для реализации архивирования данных – алгоритм сжатия данных на основе преобразования Барроуза-Уилера (Burrows-Wheeler Transform, далее BWT). Данный метод является компромиссным между быстрыми словарными алгоритмами, с одной стороны, и статистическими алгоритмами, дающими более сильное сжатие, с другой стороны.

Алгоритм RC5 потребляет относительно мало памяти. В памяти хранится исходное сообщение, результирующее, и массив подключей, который формируется из исходного ключа. Для реализации алгоритма шифрования и дешифрования RC5 была выбрана следующая структура данных: *c.nr* – количество раундов шифрования; *c.xk* – массив, содержащий в себе развернутый ключ шифрования, длиной  $2 \cdot (c.nr + 1)$  байт; *data* – массив, содержащий в себе данные для шифрования или дешифрования; *blocks* – размер массива *data* в блоках по 64 бита или 8 байт.

Макроалгоритм построения подключей шифрования:

1) Положить  $c.xk[0] = 0xb7e15163$ ; 2) Положить  $i = 1$ ; 3) Вычислить  $c.xk[i] = c.xk[i-1] + 0x9e3779b9$ ; 4) Увеличить  $i$  на единицу; 5) Если  $i$  не равно  $c.nr$ , то переход к пункту 3; 6) Положить  $i = j = X = Y = 0$ ; 7) Выполнить  $3 \cdot \max(\text{sizeof}(key), c.nr)$  раз пункты 8 – 13, после чего перейти к пункту 14; 8) Вычислить  $c.xk[i] = (c.xk[i] + X + Y) \lll 3$ ; 9) Вычислить  $X = c.xk[i]$ ; 10) Вычислить  $i = (i + 1) \cdot \text{mod}(c.nr)$ ; 11) Вычислить  $key[j] = (key[j] + X + Y) \lll (X + Y)$ ; 12) Вычислить  $Y = key[j]$ ; 13) Вычислить  $j = (j + 1) \cdot \text{mod}(\text{sizeof}(key))$ ; 14) Остановка.

На рис. 1 показана схема алгоритма шифрования и дешифрования RC5.

Для шифрования открытый текст изначально размещается в двух регистрах A и B по  $w$  битов каждый. Для обозначения левой и правой частей получаемых на выходе  $i$ -го раунда, служат символы  $LE_i$  и  $RE_i$ . Получаемый в результате шифрованный текст размещается в двух переменных  $LE_r$  и  $RE_r$ . Каждый из  $r$  раундов состоит из подстановки, в которой используется оба слова данных, перестановки, в которой также участвуют оба слова и подстановки, зависящей от ключа

Алгоритм шифрования можно представить с помощью следующего псевдокода:

$LE_0 = A + S[0]$ ;

$RE_0 = B + S[1]$ ;

For  $i = 1$  to  $r$  do

$LE_i = ((LE_{i-1} \oplus RE_{i-1}) \lll RE_{i-1}) + S[2*i]$ ;

$RE_i = ((RE_{i-1} \oplus LE_{i-1}) \lll LE_{i-1}) + S[2*i + 1]$ ;

Алгоритм дешифрования легко получается из алгоритма шифрования. Вот его представление с помощью псевдокода:

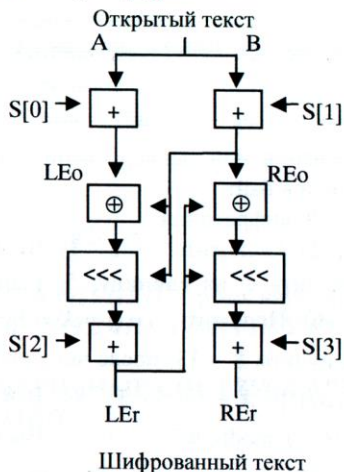
For i = r downto 1 do

$$RD_{i-1} = ((RD_i - S[2*i + 1] \ggg LD_i) \oplus LD_i);$$

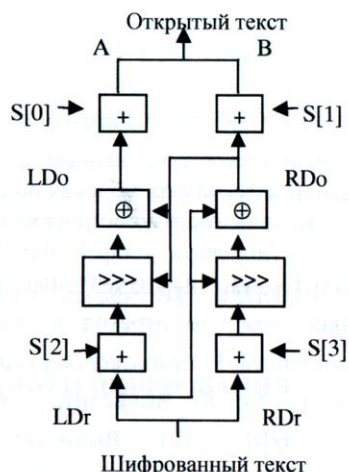
$$LD_{i-1} = ((LD_i - S[2*i] \ggg RD_{i-1}) \oplus RD_{i-1});$$

$$B = RD_0 - S[1];$$

$$A = LD_0 - S[0];$$



(а) Шифрование



(б) Дешифрование

Рис. 1 – Шифрование и дешифрование RC5

Для архивации данных воспользуемся алгоритмом сжатия на основе преобразования Барроуза-Уилера. Цель использования преобразований в сжатии данных – изменение потока входных данных к виду, позволяющему использовать более простые и эффективные модели. Фактически, посредством перестановки элементов данное преобразование превращает входной блок данных со сложными зависимостями в блок, структуру которого моделировать гораздо легче, причем отображение происходит без потерь информации.

Процедуру преобразования можно, условно, разделить на 4 этапа:

1. Выделить блок из входного потока;
2. Сформировать матрицу всех перестановок, полученных в результате циклического сдвига блока;
3. Отсортировать все перестановки в соответствии с лексикографическим порядком символов каждой перестановки;
4. Подать на выход последнего столбца матрицы и номера строки, который соответствует оригинальному блоку.



Ниже приведен макроалгоритм преобразования Барроуза-Уилера:

Входные параметры:  $T$  – выделенный блок текста,  $N$  – размер выделенного блока текста

Выходные параметры:  $T\_out$  – преобразованный блок текста,  $I$  – номер исходной строки в матрице подстановок

1) Положить  $k=1$ ; 2) Циклически сдвинуть влево выделенный блок текста  $T$  на  $k$  символов., т.е. получить  $(S_k T)[j] = T[(j+k) \bmod(N)]$ ,  $j=1, \dots, N$ . Записать полученный результат в матрицу циклических перестановок. 3) Вычислить  $k=k+1$ . Если  $k < N$ , то перейти к п.2; 4) Лексикографически упорядочить строки матрицы циклических перестановок, т.е. найти такую перестановку  $\sigma$  чисел  $\{0, \dots, N\}$  которая удовлетворяет условию  $(S_{\sigma(i)} T) \leq S_{\sigma(i+1)} T$ ,  $i=0, \dots, N-2$ , при этом запомнить номер исходной строки  $I$  в матрице. 5) Выделить последний столбец матрицы циклических перестановок  $T\_out = (S_{\sigma(I)} T)[N-1]$ . 6) Остановиться.

Вспользуемся BWT-преобразованием в алгоритме сжатия данных. Для этого каждый входной блок данных обрабатываем по следующему алгоритму:

1. Преобразовать входной блок данных по методу кодирования длин повторов; (цель: избавиться от длинных повторов одинаковых символов) 2. Преобразовать строку с помощью BWT-трансформации; 3. Преобразовать полученную строку с помощью метода перемещения стопки книг; (цель: избавиться от смены одного частого символа другим, облегчив задачу кодирования по методу Хаффману). 4. Сжать модифицированную строку, используя метод кодирования длин повторов; 5. Выполнить кодирование по алгоритму Хаффмана (цель: поставить в соответствие часто используемым элементам коды меньшей длины).

Для разархивации данных выполняются те же действия только в обратном порядке, при этом используются алгоритмы, обратные исходным.

В итоге, объединяя алгоритмы сжатия и шифрования получим гибридную систему (см. рисунок 2).



Рис. 2 – Общая схема гибридной системы шифрования и сжатия данных

На начальном этапе исходное сообщение архивируется, чем достигается искажение информационной структуры исходного блока информации, устранение избыточности данных, и как вследствие, большая криптоустойчивость. На втором этапе используется шифрование полученной информационной последовательности. Для обратного преобразования данных необходимо сначала дешифровать, а потом разархивировать сообщение, полученное по каналу связи.

**Выводы.** Разработана гибридная система шифрования и сжатия данных, которая может эффективно применяться в современных информационных системах.

**Список литературы:** 1. Столлингс В. Криптография и защита сетей: принципы и правила. — М.: Вильямс, 2001. — 669 с. 2. Ватолин Д., Ратушняк А., Смирнов М., Юкин В. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео. — М.: Диалог-МИФИ, 2003. — 384 с. 3. Брюс Шнайер. Прикладная криптография, 2-е издание. — М.: Триумф, 2002. — 816 с. 4. Burrows M., Wheeler D.J. A Block-sorting Lossless Data Compression Algorithm. — SRC Research Report 124, May 1994.

*Поступила в редколлегию 13.05.07*

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Любчик Л. М., Нурмахматов Д. Н.</i> Синтез селективно-инвариантных регуляторов уровней воды в каскадах водохранилищ.....	3
<i>Северин В. П., Лымарь А. В.</i> Моделирование парогенератора как объекта регулирования .....	9
<i>Северин В. П., Климчук В. А.</i> Анализ задач оптимизации систем автоматического регулирования паровой турбины.....	15
<i>Кадач Т. В.</i> Операционная модель трубчатых воздухоподогревателей и методы принятия решений при выборе режимов их эксплуатации.....	21
<i>Никитина Т. Б.</i> Робастное управление трехпорной управляемой платформой.....	29
<i>Ольшанский В. П., Ольшанский С. В.</i> Нелинейная модель ускорения движения испаряющейся капли газовым потоком переменной скорости .....	37
<i>Любчик Л. М., Мирошниченко А. А.</i> Диагностика разладки в структуре временных рядов на основе анализа собственных чисел сингулярно-спектрального разложения .....	44
<i>Гужва В. А., Маринчев П. А.</i> Использование метода главных компонент в задаче идентификации личности по фотороботу .....	50
<i>Кащеев Л. Б., Шкафенко Т. Н.</i> Кластеризация экологической загрязненности промышленных и социальных объектов.....	56
<i>Кащеев Л. Б., Телюпа Т. С.</i> Графическое отображение итерационных процессов .....	60

<b>Путятин В. П., Коваленко С. Н.</b> Комбинаторные аппаратные модели для решения задач оптимизации.....	64
<b>Серая О. В., Амер Шади.</b> Модель отказов деградирующих систем .....	72
<b>Кашцев Л. Б., Кованев А. Б.</b> Разработка эффективных алгоритмов оценивания сложности формирования изображения из спрайтов.....	76
<b>Кобозева А. А., Трифонова Е. А.</b> Учет свойств нормального спектрального разложения матрицы контейнера при обеспечении надежности восприятия стегосообщения .....	81
<b>Кириченко Г. С., Струкова О. В.</b> Статистичний метод стеганоаналізу.....	94
<b>Путятин В. П., Элькин А. Б.</b> Математическая модель задачи оптимизации разбиений в АПК.....	98
<b>Успенский В. Б., Асютин А. Д.</b> Разработка вычислительной модели вращения упругого КЛА, управляемого с помощью системы гиродинов .....	105
<b>Безменов Н. И., Панченко А. С., Курапова О. С.</b> Визуализация архивных данных информ ационно-вычислительных систем на атомных электростанциях .....	111
<b>Косарев Е.Ю.</b> Идентификация звуковых сигналов.....	116
<b>Саенко В. И., Голубев А. С.</b> Метод оценивания качества информационных сервисов в корпоративной сети.....	124
<b>Колбасин В. А.</b> Усовершенствованный метод распознавания сигналов набора номера в тональном режиме.....	133
<b>Гринченко Н. П., Ефремова Г. В.</b> Эффективные системы управления предприятием.....	142
<b>Кишанкова Е. Н.</b> Планирование производства продукции в активной системе.....	148
<b>Шевченко С. В.</b> Управление развитием сложных систем с учетом стадии их жизненного цикла.....	154
<b>Куценко А. С., Соколинский К. А.</b> Выделение поискового спама на основе меры ссылочной схожести веб-страниц.....	158
<b>Павлов О. А., Місюра О. Б., Халус О. А.</b> Задача мінімізації сумарного запізнення виконання незалежних завдань з директивними строками одним приладом в системі планування та управління дрібносерійним виробництвом (СПУДВ) .....	162
<b>Гамаюн И. П., Комарчук В. А.</b> Имитационное моделирование для поддержки принятия решений службой заказов такси .....	168
<b>Артюх С. Ф., Кухарев А. Л.</b> Имитационное моделирование систем электропитания ферросплавных печей .....	176
<b>Бородин В. И.</b> Исследование пригодности имитационной модели для прогнозирования последствий функционирования двухуровне=вых систем управления развитием территории .....	186
<b>Куценко А. С., Якименко К.Н, Рубин Э.Е.</b> Генератор данных для систем оценивания качества образования .....	194
<b>Куценко А. С., Бойко А. В., Литвин А. В.</b> Гибридные системы архивации и шифрования данных.....	198

**НАУКОВЕ ВИДАННЯ**  
**ВІСНИК**  
**НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО**  
**УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»**

**Збірник наукових праць**

**Тематичний випуск**  
**«Системний аналіз, управління**  
**та інформаційні технології»**

*Випуск 18*

Наукові редактори М. Д. Годлевський, О.С.Куценко  
Технічний редактор М. І. Безменов

Відповідальний за випуск І. Б. Обухова

Обл.-вид № 82-07.

Підп. до друку 15.12.06 р. Формат 60×84 1/16. Папір офісний.  
RISO-друк. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 8,5. Облік.-вид. арк. 10,1.  
Наклад 300 прим. Перший завод 1-100. Зам. № 8. Ціна договірна.

---

Видавничий центр НТУ «ХПІ».  
Свідоцтво державну реєстрацію № 116 від 10.07.2000 р.  
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

---

Друкарня «Технологічний центр». 61145, Харків, вул. Новгородська, 3а,  
тел. 750-89-90