

ISSN 1816-0301

# ИНФОРМАТИКА

4 (44)

ОКТЯБРЬ – ДЕКАБРЬ  
2014

## **Редакционная коллегия:**

*Главный редактор*

**А.В. Тузиков**

*Заместитель главного редактора*

**М.Я. Ковалев**

*Члены редколлегии*

С.В. Абламейко, В.В. Анищенко, П.Н. Бибило, М.Н. Бобов,  
А.Н. Дудин, А.Д. Закревский, С.Я. Килин, В.В. Краснопрошин,  
С.П. Кундас, Н.А. Лиходед, П.П. Матус, С.В. Медведев, А.А. Петровский,  
Ю.Н. Сотсков, Ю.С. Харин, А.Ф. Чернявский, В.Н. Ярмолик  
Н.А. Рудая (*заведующая редакцией*)

---

*Адрес редакции:*

220012, Минск,  
ул. Сурганова, 6, к. 305  
тел. (017) 284-26-22  
e-mail: [rio@newman.bas-net.by](mailto:rio@newman.bas-net.by)  
<http://uiip.bas-net.by>

# ИНФОРМАТИКА

---

---

ЕЖЕКВАРТАЛЬНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

*Издается с января 2004 г.*

---

---

№ 4(44) • октябрь-декабрь 2014

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

- Ерофеев В.Т., Сеницын А.К.** Прохождение симметричных волн через бианизотропно-гиротропную перегородку в круглом волноводе с импедансными граничными условиями..... 5
- Кузьминский Ю.Г., Шилько С.В.** Метод диагностики сердечно-сосудистой системы на основе одномерной модели гемодинамики..... 19
- Прокопович Г.А.** Моделирование адаптивного поведения на примере движения автономного мобильного робота по плоскости с препятствиями..... 34
- Шалькевич П.К., Кундас С.П., Гишкелюк И.А.** Реализация алгоритма параллельных вычислений задачи неизотермического влагопереноса в природных дисперсных средах..... 44
- Рыбак В.А., Сулайман Х.М.** Интеллектуальная поддержка принятия решений на рынке Форекс..... 52

### ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ, ИЗОБРАЖЕНИЙ И РАСПОЗНАВАНИЕ ОБРАЗОВ

- Сидоревич А.Н., Давыденко И.Н.** Синтез и имитационное моделирование компенсатора активных шумовых помех с двухпараметрическим корректором частотных характеристик ..... 59
- Середин Э.Н., Залесский Б.А.** Алгоритм интерактивного выделения линейных объектов на аэрофотоснимках и космических изображениях ..... 66

<b>Абрамович М.С., Анищенко С.В., Мицкевич М.Н., Быданов О.И.</b> Пространственно-временной кластерный анализ заболеваемости.....	75
<b>Жабинский А.В.</b> Распознавание эмоций по изображению лица с использованием текстового анализа .....	85

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

<b>Левин Г.М., Розин Б.М., Стеблинская О.И.</b> Оптимизация динамически изменяемых режимов групповой обработки резанием на многопозиционном многоинструментальном оборудовании.....	91
<b>Розин Б.М., Зданович В.Е.</b> К синтезу компоновок агрегатных станков для групповой обработки .....	100
<b>Бутов А.А.</b> Метод построения булевой формулы многоугольника в дизъюнктивной нормальной форме .....	117

---



---

Редактор Г.Б. Гончаренко  
Корректор А.А. Михайлова  
Компьютерная верстка Д.С. Гавинович

---

Сдано в набор 03.11.2014. Подписано в печать 05.12.2014.  
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Усл. печ. л. 14,4. Уч.-изд. л. 14,1. Тираж 100 экз. Заказ 31.

---

Государственное научное учреждение «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/274 от 04.04.2014.  
ЛП № 02330/444 от 18.12.13.  
Ул. Сурганова, 6, 220012, Минск.

THE UNITED INSTITUTE OF INFORMATICS PROBLEMS  
OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

---

---

# INFORMATICS

---

---

PUBLISHED QUATERLY

*Issued since 2004*

---

---

№ 4(44) • October-December 2014

## CONTENTS

### MATHEMATICAL MODELING

- Erofeenko V.T., Sinitsyn A.K.** Transmission of the symmetric waves through a bianisotropic-gyrotropic diaphragm in the circular waveguide with the impedance boundary conditions..... 5
- Kuzminsky Yu.G., Shilko S.V.** Method of cardiovascular system on the basis of one dimension haemodynamics model ..... 19
- Prakapovich R.A.** Simulation of adaptive behavior in the context of solving an autonomous robotic vehicle motion task on two-dimensional plane with obstacles ..... 34
- Shalkevich P.K., Kundas S.P., Gishkeluk I.A.** Implementation of the parallel algorithm of nonisothermal heat and moisture migration task simulation in natural disperse environments ..... 44
- Rybak V.A., Sulaiman H.M.** Intelligent decision support on Forex ..... 52

### SIGNAL, IMAGE PROCESSING AND PATTERN RECOGNITION

- Sidorevich A.N., Davydenko I.N.** Synthesis and simulation of the compensator of active noise interference with a two-parameter corrector of frequency characteristics ..... 59
- Seredin E.N., Zalesky B.A.** Interactive algorithm for selection of linear objects on aerial photographs and satellite images..... 66
- Abramovich M.S., Anishchanka S.V., Mitskevich M.M., Bydanov O.I.** Spatio-temporal cluster analysis of disease..... 75
- Zhabinski A.V.** Emotion recognition using texture analysis ..... 85

## DESIGN AUTOMATION

<b>Levin G.M., Rozin B.M., Steblinskaya O.I.</b> Optimization of dynamically variable cutting modes of batch processing on multi-position multi-tool equipment .....	91
<b>Rozin B.M., Zdanovich V.E.</b> To the synthesis of a layout of machine tool for batch processing.....	100
<b>Butov A.A.</b> The method of constructing a boolean formula of a polygon in the disjunctive normal form.....	117

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 517.8.958:537.8:621.958:621.372.81.09

В.Т. Ерофеев, А.К. Синицын

**ПРОХОЖДЕНИЕ СИММЕТРИЧНЫХ ВОЛН ЧЕРЕЗ  
БИАНИЗОТРОПНО-ГИРОТРОПНУЮ ПЕРЕГОРОДКУ В КРУГЛОМ  
ВОЛНОВОДЕ С ИМПЕДАНСНЫМИ ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ**

*Предлагается методика решения краевой задачи прохождения парциальных симметричных  $E$ - и  $H$ -волн круглого регулярного волновода с идеально проводящими стенками через азимутально-симметричную неоднородную перегородку из бианизотропно-гиротропного материала с импедансными граничными условиями в области перегородки, учитывающими поглощение электромагнитной энергии проводящим материалом стенки волновода. Решение задачи сводится к численному решению системы уравнений с частными производными для скалярных потенциалов. Исследуются условия взаимного преобразования  $H_{01}$ - и  $E_{01}$ -волн при прохождении через плоскую перегородку с различными свойствами бианизотропии и поглощения стенкой волновода.*

**Введение**

В настоящее время для математического моделирования актуальным является исследование взаимодействий электромагнитных волн со сложно структурированными материалами: композитными [1]; анизотропными, биизотропными и бианизотропными [2–5]. Практический интерес вызывают исследования электродинамических свойств анизотропных сред, включающих кристаллы, ферриты, намагниченную плазму и гиротропные материалы [6]. Исследуются однослойные и многослойные экраны из анизотропных и бианизотропных материалов [7–10]. В технических устройствах радиотехники широко используются волноводы и волноведущие структуры [11, 12]. В частности, волноводы применяются для исследования свойств материалов, которые включаются в волновод в виде диафрагмы. Также волноводы с перегородками и включениями используются как фильтры и преобразователи типов волн [13–17]. Как правило, исследуются волноводы с идеально проводящими стенками, что облегчает аналитическое моделирование. Для построения более точных моделей необходимо учитывать поглощение энергии стенками волноводов, которые выполнены из различных материалов. Классическим методом моделирования поглощения в стенке является метод импедансных граничных условий Щукина – Леонтовича [18]. Этот метод получил развитие применительно к различным типам электромагнитных полей и материалам массивных поверхностей. Получены импедансные граничные условия для анизотропных поверхностей [19], для поверхностей с многослойными покрытиями [20, 21], для искривленных поверхностей с учетом кривизны [22] в случае монохроматических полей и интегральные граничные условия для нестационарных и импульсных полей [23–27].

В предлагаемой статье сформулированы импедансные граничные условия для скалярных потенциалов на стенке волновода с учетом кривизны поверхности при воздействии монохроматических полей из бианизотропной перегородки. Решение задачи отражения и прохождения симметричных  $E$ - и  $H$ -парциальных волн круглого волновода через бианизотропно-гиротропную перегородку сведено к численному решению прямым сеточным методом блочной матричной прогонки [28] краевой задачи для системы двух эллиптических уравнений с интегральными граничными условиями излучения [29] на торцах волновода с учетом импедансных граничных условий.

**1. Краевая задача для симметричных волн в круглом волноводе с бианизотропно-гиротропной перегородкой**

Рассмотрим полый цилиндрический волновод круглого поперечного сечения радиуса  $b'$  с идеально проводящей границей, в котором находится азимутально-симметричная бианизотропная перегородка конечной толщины. Вне перегородки волновод заполнен вакуумом (рис. 1).

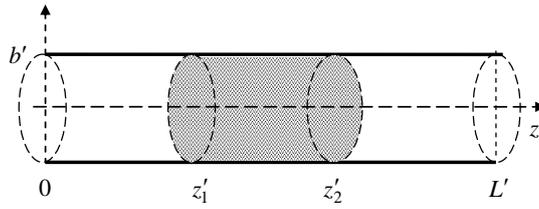


Рис. 1. Круглый волновод с бианизотропной перегородкой

Предполагаем, что слева из области  $z' < 0$  на перегородку в интервале  $z'_1 < z' < z'_2$  набегают парциальная волна волновода с осевой симметрией  $\dot{\vec{E}}'_0, \dot{\vec{H}}'_0$  с частотой  $\omega = 2\pi f$ . Вследствие ее взаимодействия с перегородкой внутри волновода образуется подлежащее определению результирующее электромагнитное поле  $(\vec{E}', \vec{H}') = \text{Re}\left\{\left(\dot{\vec{E}}', \dot{\vec{H}}'\right) \exp(j\omega t')\right\}$ , представляющее в расчетной области  $0 < z' < L'$  суперпозицию набегающей  $\dot{\vec{E}}'_0, \dot{\vec{H}}'_0$ ,  $z' < z'_1$ , отраженной  $\dot{\vec{E}}'_1, \dot{\vec{H}}'_1$ ,  $z' < z'_1$ , и проходящей  $\dot{\vec{E}}'_2, \dot{\vec{H}}'_2$ ,  $z' > z'_2$ , волн. Здесь точкой сверху помечены комплексные переменные, штрихом – размерные переменные, имеющие одинаковое наименование с соответствующими безразмерными переменными.

Запишем материальные уравнения бианизотропно-гиротропной среды в виде

$$\dot{\vec{B}}' = \mu_0 \ddot{\mu} \cdot \dot{\vec{H}}' + \ddot{\chi}_e / c \cdot \dot{\vec{E}}'; \quad \dot{\vec{D}}' = \varepsilon_0 \ddot{\varepsilon} \cdot \dot{\vec{E}}' + \ddot{\chi}_h / c \cdot \dot{\vec{H}}', \quad (1)$$

где

$$\ddot{\mu} = \begin{bmatrix} \mu_1 & -\mu_2 & 0 \\ \mu_2 & \mu_1 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_3 \end{bmatrix}; \quad \ddot{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 & -\varepsilon_2 & 0 \\ \varepsilon_2 & \varepsilon_1 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{bmatrix}; \quad \ddot{\chi}_e = \begin{bmatrix} \chi_{e1} & -\chi_{e2} & 0 \\ \chi_{e2} & \chi_{e1} & 0 \\ 0 & 0 & \chi_{e3} \end{bmatrix}; \quad \ddot{\chi}_h = \begin{bmatrix} \chi_{h1} & -\chi_{h2} & 0 \\ \chi_{h2} & \chi_{h1} & 0 \\ 0 & 0 & \chi_{h3} \end{bmatrix}.$$

Здесь  $\mu_0, \varepsilon_0$  – магнитная и диэлектрическая постоянные вакуума;  $\ddot{\mu}, \ddot{\varepsilon}$  – комплексные относительные магнитная и диэлектрическая тензорные проницаемости среды;  $\ddot{\chi}_e, \ddot{\chi}_h$  – комплексные безразмерные тензоры, характеризующие бианизотропность среды;  $c$  – скорость света. Для вакуума  $\ddot{\varepsilon} = I, \ddot{\mu} = I, \ddot{\chi}_e = 0, \ddot{\chi}_h = 0, I$  – единичная матрица.

Для описания результирующего электромагнитного поля на заданной частоте в рассматриваемом волноводе будем использовать безразмерные уравнения Максвелла для комплексных амплитуд вида

$$\begin{aligned} \text{rot } \dot{\vec{E}}' &= -jW \left[ \ddot{\mu}(z) \dot{\vec{H}}' + \ddot{\chi}_e(z) \dot{\vec{E}}' \right]; \quad \text{rot } \dot{\vec{H}}' = jW \left[ \ddot{\varepsilon}(z) \dot{\vec{E}}' + \ddot{\chi}_h(z) \dot{\vec{H}}' \right], \quad z'_1 < z' < z'_2; \\ \text{rot } \dot{\vec{E}}'_1 &= -jW \dot{\vec{H}}'_1; \quad \text{rot } \dot{\vec{H}}'_1 = jW \dot{\vec{E}}'_1, \quad z' < z'_1; \quad \text{rot } \dot{\vec{E}}'_2 = -jW \dot{\vec{H}}'_2; \quad \text{rot } \dot{\vec{H}}'_2 = jW \dot{\vec{E}}'_2, \quad z' > z'_2. \end{aligned} \quad (2)$$

Для результирующих полей на разделах сред  $z = z_1, z = z_2$  удовлетворяются граничные условия непрерывности тангенциальных составляющих, а на границах расчетной области  $z = 0, z = L$  для отраженных и проходящих полей выполняются условия излучения. На стенках волновода выполнено условие  $\left[ \dot{\vec{E}}', \vec{r}_0 \right]_{r=b} = 0$ . В области перегородки будем использовать импедансные граничные условия, учитывающие поглощение электромагнитной энергии стенкой волновода. Вывод граничных условий будет описан в разд. 4.

Здесь  $W = \omega / \omega_0$ ,  $\omega$  – рабочая частота,  $\omega_0 = 2\pi c / \lambda_0$  – опорная частота,  $\lambda_0$  – опорная длина волны, выбранные для перехода к безразмерным переменным. Используется цилиндрическая система координат  $(r, \varphi, z)$ . Введены следующие соотношения между размерными величинами (со штрихом) и соответствующими им безразмерными (без штриха):  $t = \omega_0 t'$  – время,

$(r, z, z_1, z_2, b, L) = (r', z', z'_1, z'_2, b', L') \cdot 2\pi / \lambda_0$ ,  $b'$  – радиус волновода,  $L'$  – длина отрезка волновода, на котором производится расчет,  $z'_1, z'_2$  – крайние границы бианизотропной вставки ( $0 < z_1 < z_2 < L$ );  $\dot{\vec{E}} = \dot{E}' / E_m$ ,  $\dot{\vec{H}} = \mu_0 c \dot{H}' / E_m$ ,  $E_m$  – характерная амплитуда электрического поля;  $\dot{\vec{E}}'$ ,  $\dot{\vec{H}}'$  – комплексные амплитуды векторов напряженности электрического и магнитного полей с физической размерностью;  $\dot{\vec{E}}$ ,  $\dot{\vec{H}}$  – безразмерные комплексные амплитуды векторов поля.

Материальные параметры на границах перегородки испытывают разрыв первого рода, однако при этом выполняется непрерывность тангенциальных составляющих полей. При численном решении уравнений (2) в области  $0 < z < L$  методом сеток обеспечение «внутренних» граничных условий осуществляется за счет однородной консервативной конечноразностной схемы «сквозного» счета, полученной на основе интегроинтерполяционного метода [28].

Для формулировки граничных условий на стенке волновода  $r = b$  и в поперечных сечениях  $z = 0$ ,  $z = L$ , ограничивающих расчетную область  $\Omega = \{0 \leq r \leq b; 0 \leq \varphi \leq 2\pi; 0 \leq z \leq L\}$ , воспользуемся условием азимутальной симметрии и для частного случая симметричных волн преобразуем векторную систему (2) к системе двух связанных скалярных уравнений.

## 2. Система уравнений для потенциалов электромагнитного поля

Представим векторы полей в виде

$$\dot{\vec{E}} = E_r \vec{r}_0 + E_\varphi \vec{\varphi}_0 + E_z \vec{z}_0, \quad \dot{\vec{H}} = H_r \vec{r}_0 + H_\varphi \vec{\varphi}_0 + H_z \vec{z}_0, \quad (3)$$

где  $\vec{r}_0, \vec{\varphi}_0, \vec{z}_0$  – орты цилиндрической системы координат. Будем рассматривать симметричные волны, для которых все компоненты полей (3) не зависят от координаты  $\varphi$ .

Введем потенциалы

$$\bar{u} = rE_\varphi, \quad \bar{v} = rH_\varphi \quad (4)$$

и выразим через них компоненты поля, рассматривая исходные материальные тензоры в базисе  $\vec{r}_0, \vec{\varphi}_0, \vec{z}_0$ :

$$E_r = \frac{1}{r} \left[ \frac{j}{Wg_1} (\chi_{h1} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \mu_1 \frac{\partial \bar{v}}{\partial z}) - \alpha_{11} \bar{u} - \alpha_{12} \bar{v} \right], \quad H_r = -\frac{1}{r} \left[ \frac{j}{Wg_1} (\varepsilon_1 \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \chi_{e1} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z}) - \alpha_{21} \bar{u} - \alpha_{22} \bar{v} \right], \quad (5)$$

$$E_z = -\frac{j}{rWg_3} (\chi_{h3} \frac{\partial \bar{u}}{\partial r} + \mu_3 \frac{\partial \bar{v}}{\partial r}), \quad H_z = \frac{j}{rWg_3} (\varepsilon_3 \frac{\partial \bar{u}}{\partial r} + \chi_{e3} \frac{\partial \bar{v}}{\partial r}),$$

где

$$\alpha_{11} = \frac{1}{g_1} (\chi_{h1} \chi_{e2} - \mu_1 \varepsilon_2), \quad \alpha_{12} = \frac{1}{g_1} (\mu_2 \chi_{h1} - \mu_1 \chi_{h2}),$$

$$\alpha_{21} = \frac{1}{g_1} (\varepsilon_1 \chi_{e2} - \varepsilon_2 \chi_{e1}), \quad \alpha_{22} = \frac{1}{g_1} (\varepsilon_1 \mu_2 - \chi_{e1} \chi_{h2}),$$

$$g_1 = \mu_1 \varepsilon_1 - \chi_{e1} \chi_{h1}, \quad g_3 = \mu_3 \varepsilon_3 - \chi_{e3} \chi_{h3}.$$

Используя соотношения (5), преобразуем уравнения Максвелла (2) для бианизотропно-гиротропной среды к эллиптической системе двух скалярных уравнений с частными производными:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\chi_{h3}}{g_3 r} \frac{\partial \bar{u}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\chi_{h1}}{g_1 r} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\mu_3}{g_3 r} \frac{\partial \bar{v}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu_1}{g_1 r} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) +$$

$$+ jW \left[ \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\alpha_{11}}{r} \bar{u} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\alpha_{12}}{r} \bar{v} \right) + \frac{c_1}{g_1 r} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{c_2}{g_1 r} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right] + \frac{W^2}{r} (c_3 \bar{u} + c_4 \bar{v}) = 0, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\varepsilon_3}{g_3 r} \frac{\partial \bar{u}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\varepsilon_1}{g_1 r} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\chi_{e3}}{g_3 r} \frac{\partial \bar{v}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\chi_{e1}}{g_1 r} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) + \\ & + jW \left[ \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\alpha_{21}}{r} \bar{u} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\alpha_{22}}{r} \bar{v} \right) + \frac{b_1}{g_1 r} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{b_2}{g_1 r} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right] + \frac{W^2}{r} (b_3 \bar{u} + b_4 \bar{v}) = 0, \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} c_1 &= \chi_{h1} \chi_{e2} - \varepsilon_1 \mu_2, \quad c_2 = \mu_1 \chi_{e2} - \chi_{e1} \mu_2, \\ c_3 &= \mu_2 \alpha_{21} - \chi_{e2} \alpha_{11} + \chi_{e1}, \quad c_4 = \mu_2 \alpha_{22} - \chi_{e2} \alpha_{12} + \mu_1, \\ b_1 &= \chi_{h1} \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \chi_{h2}, \quad b_2 = \mu_1 \varepsilon_2 - \chi_{e1} \chi_{h2}, \\ b_3 &= \chi_{h2} \alpha_{21} - \varepsilon_2 \alpha_{11} + \varepsilon_1, \quad b_4 = \chi_{h2} \alpha_{22} - \varepsilon_2 \alpha_{12} + \chi_{h1}. \end{aligned} \quad (7)$$

Для удобства численного решения системы (6) сделаем замену переменных  $\rho=r/b$ ,  $u(\rho, z) = \rho E_\varphi = \bar{u}/b$ ,  $v(\rho, z) = \rho H_\varphi = \bar{v}/b$ , которая отображает рассматриваемый волновод на волновод единичного радиуса. Уравнения (6) в области  $D = \{0 \leq \rho \leq 1, 0 \leq z \leq L\}$  запишем в стандартном виде:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \rho} \left( a_{11} \frac{\partial u}{\partial \rho} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( a_{12} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial \rho} \left( a_{13} \frac{\partial v}{\partial \rho} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( a_{14} \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \\ & + W \left[ \frac{\partial}{\partial z} (c_{11} u) + \frac{\partial}{\partial z} (c_{12} v) + c_{13} \frac{\partial u}{\partial z} + c_{14} \frac{\partial v}{\partial z} \right] + W^2 (b_{11} u + b_{12} v) = 0, \\ & \frac{\partial}{\partial \rho} \left( a_{21} \frac{\partial u}{\partial \rho} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( a_{22} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial \rho} \left( a_{23} \frac{\partial v}{\partial \rho} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( a_{24} \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \\ & + W \left[ \frac{\partial}{\partial z} (c_{21} u) + \frac{\partial}{\partial z} (c_{22} v) + c_{23} \frac{\partial u}{\partial z} + c_{24} \frac{\partial v}{\partial z} \right] + W^2 (b_{21} u + b_{22} v) = 0, \end{aligned} \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned} a_{11} &= \frac{\chi_{h3}}{g_3 \rho b^2}, \quad a_{12} = \frac{\chi_{h1}}{g_1 \rho}, \quad a_{13} = \frac{\mu_3}{g_3 \rho b^2}, \quad a_{14} = \frac{\mu_1}{g_1 \rho}, \\ c_{11} &= \frac{j\alpha_{11}}{\rho}, \quad c_{12} = \frac{j\alpha_{12}}{\rho}, \quad c_{13} = \frac{jc_1}{g_1 \rho}, \quad c_{14} = \frac{jc_2}{g_1 \rho}, \quad b_{11} = \frac{c_3}{\rho}, \quad b_{12} = \frac{c_4}{\rho}, \\ a_{21} &= \frac{\varepsilon_3}{g_3 \rho b^2}, \quad a_{22} = \frac{\varepsilon_1}{g_1 \rho}, \quad a_{23} = \frac{\chi_{e3}}{g_3 \rho b^2}, \quad a_{24} = \frac{\chi_{e1}}{g_1 \rho}, \\ c_{21} &= \frac{j\alpha_{21}}{\rho}, \quad c_{22} = \frac{j\alpha_{22}}{\rho}, \quad c_{23} = \frac{jb_1}{g_1 \rho}, \quad c_{24} = \frac{jb_2}{g_1 \rho}, \quad b_{21} = \frac{b_3}{\rho}, \quad b_{22} = \frac{b_4}{\rho}. \end{aligned} \quad (9)$$

В областях волновода, заполненных вакуумом ( $\vec{\chi}_e = 0$ ,  $\vec{\chi}_h = 0$ ,  $\vec{\varepsilon} = I$ ,  $\vec{\mu} = I$ ), система (8) распадается на два независимых уравнения: первое из них описывает симметричные  $H$ -волны, второе –  $E$ -волны. В области, занятой бианизотропной средой, эти волны оказываются связанными и взаимодействуют друг с другом. Заметим, что полученная система уравнений описывает распространение волн через аксиально-симметричную бианизотропную среду при неоднородном распределении ее свойств, в частности при наличии разрывов материальных коэффициентов. При этом уравнения (8) справедливы, когда матричные элементы тензоров в (1) являются функциями от  $r'$ ,  $z'$ . В этом случае в (7), (9) следует произвести замену пере-

менных  $r' = \frac{cb}{\omega_0} \rho$ ,  $z' = \frac{c}{\omega_0} z$ .

### 3. Разложение потенциалов по собственным функциям волновода

Для исследования структуры отраженного и прошедшего через перегородку полей представим потенциалы в виде рядов по бесконечной системе собственных симметричных функций регулярного волновода, заполненного вакуумом. Собственные волны  $\dot{E}^0, \dot{H}^0$  регулярного пустого волновода круглого сечения, являющиеся решениями уравнений Максвелла (2) в областях  $-\infty < z < z_1, z_2 < z < +\infty$  при граничных условиях  $[\vec{r}_0 \cdot \dot{E}^0]_{|\rho=1} = 0$ , описаны в работе [11].

Решение для результирующего поля  $\dot{E}, \dot{H}$  в сечениях  $z = \text{const}$  представим в виде разложения по мембранным вектор-функциям с коэффициентами, зависящими от  $z$  [15]. В результате для потенциалов  $u, v$  получим разложения по мембранным функциям  $J_1(\mu_{0i}\rho), J_1(\nu_{0i}\rho)$ , соответствующим собственным волнам:

$$u(\rho, z) = \rho \dot{E}_{0\phi}(\rho, z) = \sum_{i=1}^{\infty} \dot{U}_i(z) \rho J_1(\mu_{0i}\rho), \quad v(\rho, z) = \rho \dot{H}_{0\phi}(\rho, z) = \sum_{i=1}^{\infty} \dot{V}_i(z) \rho J_1(\nu_{0i}\rho), \quad (10)$$

где  $\nu_{0i}$  – корни уравнения  $J_0(\nu) = 0, \nu > 0$ ;  $\mu_{0i}$  – корни уравнения  $J'_0(\mu) = 0, \mu > 0$ ;  $J_m(x)$  – функция Бесселя.

На регулярных участках  $-\infty < z < z_1, z_2 < z < \infty$  амплитуды  $\dot{U}_i(z), \dot{V}_i(z)$  представляются в виде разложения по системе прямых (знак « $\leftarrow$ » в экспоненте) и обратных (знак « $\rightarrow$ » в экспоненте) собственных  $E_{0i}$ - и  $H_{0i}$ -волн:

$$\dot{U}_i(z) = W \left( a_i^{m+} \exp(-jk_i^m z) + a_i^{m-} \exp(+jk_i^m z) \right), \quad k_i^m = \begin{cases} + \sqrt{W^2 - (\mu_{0i}/b)^2}, & W > \mu_{0i}/b, \\ -j\sqrt{(\mu_{0i}/b)^2 - W^2}, & W < \mu_{0i}/b; \end{cases} \quad (11)$$

$$\dot{V}_i(z) = W \left( a_i^{e+} \exp(-jk_i^e z) + a_i^{e-} \exp(+jk_i^e z) \right), \quad k_i^e = \begin{cases} + \sqrt{W^2 - (\nu_{0i}/b)^2}, & W > \nu_{0i}/b, \\ -j\sqrt{(\nu_{0i}/b)^2 - W^2}, & W < \nu_{0i}/b, \end{cases}$$

где  $a_i^{m\pm}, a_i^{e\pm}$  – амплитуды прямой и обратной собственных волн;  $k_i^m, k_i^e$  – волновые числа.

Предполагаем, что на начальном сечении при  $z = 0$  заданы набегающие слева  $H_{0i}$ -волны с индексами  $p$  и заданными амплитудами  $a_{0p}^{m+}, a_{0i(i \neq p)}^{m+} = 0$  и  $E_{0i}$ -волны с индексами  $r$  и заданными амплитудами  $a_{0r}^{e+}$  ( $a_{0i(i \neq r)}^{e+} = 0$ ). Это означает, что первичное поле  $\dot{E}_0, \dot{H}_0$  набегающей на перегородку симметричной волны определяется потенциалами

$$u_0 = \rho \dot{E}_{0\phi}(\rho, z) = W \sum_p a_{0p}^{m+} \exp(-jk_p^e z) \rho J_1(\mu_{0p}\rho),$$

$$v_0 = \rho \dot{H}_{0\phi}(\rho, z) = W \sum_r a_{0r}^{e+} \exp(-jk_r^e z) \rho J_1(\nu_{0r}\rho).$$

### 4. Модели импедансных граничных условий на поверхности волновода

В области перегородки ( $\rho = 1; z_1 < z < z_2$ ) стенка волновода выполнена из материала с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon'_s = \epsilon_0 \epsilon_s = \epsilon_0 (\epsilon_I - j\epsilon_{II})$  и магнитной проницаемостью  $\mu'_s = \mu_0 \mu_s = \mu_0 (\mu_I - j\mu_{II})$ . Будем предполагать, что толщина проводящей стенки волновода значительно больше глубины проникновения электромагнитного поля в материал, из которого она изготовлена. Поле в стенке волновода представим через базисные цилиндрические поля [26, с. 129] в принятых безразмерных переменных

$$\dot{E}_s = q_1 \tilde{U}_0^{(1)}(\vec{r}, k_s) + q_2 \tilde{U}_0^{(2)}(\vec{r}, k_s), \quad \dot{H}_s = j \frac{n_s}{\mu_s} \left( q_1 \tilde{U}_0^{(2)}(\vec{r}, k_s) + q_2 \tilde{U}_0^{(1)}(\vec{r}, k_s) \right), \quad 1 < \rho < \infty, \quad (12)$$

где  $q_1, q_2 = \text{const}$ ,  $n_s = \sqrt{\varepsilon_s \mu_s}$ ,  $-\pi < \arg n_s < 0$ ;

$$\tilde{U}_0^{(1)}(\vec{r}, k_s) = A(\lambda, \rho) \bar{\varphi}_0, \quad \tilde{U}_0^{(2)}(\vec{r}, k_s) = B(\lambda, \rho) \bar{r}_0 - C(\lambda, \rho) \bar{z}_0,$$

$$A(\lambda, \rho) = K_1(W w(\lambda) b \rho) \exp(jWz), \quad B(\lambda, \rho) = -\frac{j\lambda}{n_s} K_1(W w(\lambda) b \rho) \exp(jWz),$$

$$C(\lambda, \rho) = \frac{w(\lambda)}{n_s} K_0(W w(\lambda) b \rho) \exp(jWz), \quad w(\lambda) = \sqrt{\lambda^2 - \varepsilon_s \mu_s}, \quad -\frac{\pi}{2} < \arg w \leq \frac{\pi}{2},$$

$\lambda$  – параметр,  $K_m(\cdot)$  – функция Макдональда [30].

Теперь запишем тангенциальные составляющие полей (12) на поверхности волновода ( $\rho = 1$ ):

$$\dot{E}_{s,\tau} = q_1 A(\lambda, 1) \bar{\varphi}_0 - q_2 C(\lambda, 1) \bar{z}_0, \quad \dot{H}_{s,\tau} = j \frac{n_s}{\mu_s} (q_1 A(\lambda, 1) \bar{\varphi}_0 - q_2 C(\lambda, 1) \bar{z}_0). \quad (13)$$

Тангенциальные составляющие полей (3), примыкающих к поверхности из внутренней области волновода, имеют вид

$$\dot{E}_\tau \Big|_{\rho=1} = E_\varphi \bar{\varphi}_0 + E_z \bar{z}_0, \quad \dot{H}_\tau \Big|_{\rho=1} = H_\varphi \bar{\varphi}_0 + H_z \bar{z}_0. \quad (14)$$

В силу непрерывности тангенциальных составляющих на поверхности раздела сред приравняем поля (13), (14). Получим скалярные соотношения

$$E_\varphi = q_1 A(\lambda, 1), \quad E_z = -q_2 C(\lambda, 1), \quad H_\varphi = j q_2 \frac{n_s}{\mu_s} A(\lambda, 1), \quad H_z = -j q_1 \frac{n_s}{\mu_s} C(\lambda, 1). \quad (15)$$

Параметр  $\lambda$  определяет наклон потока энергии, под которым энергия утекает во внешнее пространство. В формулах (15) положим  $\lambda = 0$ , так как при моделировании будем предполагать, что энергия движется в радиальном направлении, т. е. ортогонально поверхности волновода. Такое допущение используется в импедансных граничных условиях Щукина – Леонтовича [18]. Исключая коэффициенты  $q_1, q_2$ , получим импедансные граничные условия, учитывающие кривизну поверхности  $\rho = 1$  [22]:

$$E_\varphi = Z_1 H_z, \quad E_z = -Z_2 H_\varphi, \quad (16)$$

где  $Z_1 = Q \mu_s / n_s$ ,  $Z_2 = \mu_s / (n_s Q)$ ,  $w(0) = j n_s$ ,  $Q = K_1(j W n_s b) / K_0(j W n_s b)$ ,  $Q \approx \left( 1 + \frac{3}{8} q - \frac{15}{128} q^2 \right) / \left( 1 - \frac{1}{8} q + \frac{9}{128} q^2 \right)$ ,  $q = 1 / (j W n_s b)$ ,  $b$  – безразмерный радиус кривизны поверхности вдоль координаты  $\varphi$  (совпадает с радиусом волновода).

В случае среды с электрическими потерями имеем  $\mu_I > 0$ ,  $\mu_{II} = 0$ ,  $\varepsilon_I > 0$ ,  $\varepsilon_{II} > 0$ ,  $\varepsilon_s = \varepsilon_I (1 - j \text{tg} \Delta_\sigma)$ ,  $\text{tg} \Delta_\sigma = \varepsilon_{II} / \varepsilon_I$ ,  $\Delta_\sigma$  – угол электрических потерь [6, с. 121],  $n_s = n_I - j n_{II}$ ,

$n_I = \sqrt{\frac{\mu_I}{2} (|\varepsilon_s| + \varepsilon_I)}$ ,  $n_{II} = \sqrt{\frac{\mu_I}{2} (|\varepsilon_s| - \varepsilon_I)}$ . Если  $\sigma'$  – удельная электрическая проводимость стенки волновода, то  $\varepsilon_{II} = \frac{\sigma'}{W \omega_0 \varepsilon_0} = \frac{\sigma' \lambda_0}{2\pi W c \varepsilon_0}$ .

Если не учитывать кривизну поверхности, то, положив  $Q = 1$ , получим граничные условия Щукина – Леонтовича:  $Z_1 = Z_2 = Z = (1 + j) \sqrt{\frac{W \mu_s \omega_0 \varepsilon_0}{2\sigma'}}$ .

Используя формулы (4), (5), преобразуем (16) к импедансным граничным условиям для потенциалов  $u$ ,  $v$  в области перегородки ( $z_1 < z < z_2$ ,  $\rho = 1$ ):

$$u|_{\rho=1} = \frac{jZ_1}{bWg_3} \left( \varepsilon_3 \frac{\partial u}{\partial \rho} + \chi_{e3} \frac{\partial v}{\partial \rho} \right)_{\rho=1}, \quad v|_{\rho=1} = \frac{j}{bWg_3Z_2} \left( \chi_{h3} \frac{\partial u}{\partial \rho} + \mu_3 \frac{\partial v}{\partial \rho} \right)_{\rho=1}. \quad (17)$$

На идеально проводящей стенке волновода выполняются условия

$$u|_{\rho=1} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial \rho} \Big|_{\rho=1} = 0, \quad 0 < z < z_1, \quad z_2 < z < L. \quad (18)$$

При этом на оси цилиндра выполняются условия  $u|_{\rho=0} = 0$ ;  $v|_{\rho=0} = 0$ . Вместо условий идеальной проводимости (18) могут использоваться граничные условия

$$u|_{\rho=1} = \frac{jZ_1}{bW} \frac{\partial u}{\partial \rho} \Big|_{\rho=1}, \quad v|_{\rho=1} = \frac{j}{bWZ_2} \frac{\partial v}{\partial \rho} \Big|_{\rho=1}.$$

### 5. Условия излучения для потенциалов в торцах волновода

При формулировке интегральных условий излучения на начальном ( $z = 0$ ) и конечном ( $z = L$ ) сечениях расчетной области волновода используются следующие граничные условия:

1. На сечении  $z = 0$  интегральные граничные условия имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial u(\rho, 0)}{\partial z} - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{jk_i^m}{h_{0i}} \rho J_1(\mu_{0i}\rho) \int_0^1 u(\bar{\rho}, 0) J_1(\mu_{0i}\bar{\rho}) d\bar{\rho} &= -2jW \sum_p k_p^m a_{0p}^{m+} \rho J_1(\mu_{0p}\rho), \\ \frac{\partial v(\rho, 0)}{\partial z} - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{jk_i^e}{e_{0i}} \rho J_1(\nu_{0i}\rho) \int_0^1 v(\bar{\rho}, 0) J_1(\nu_{0i}\bar{\rho}) d\bar{\rho} &= -2jW \sum_r k_r^e a_{0r}^{e+} \rho J_1(\nu_{0r}\rho). \end{aligned} \quad (19)$$

Здесь  $h_{0i} = \frac{1}{2} J_0^2(\mu_{0i})$ ,  $e_{0i} = \frac{1}{2} J_1^2(\nu_{0i})$ .

2. Если предположить, что на сечении  $z = L$  заданы набегающие справа  $H$ -волны с индексами  $p$  и заданными амплитудами  $a_{0p}^{m-}$  ( $a_{Li(i \neq p)}^{m-} = 0$ ) и  $E$ -волны с индексами  $r$  и заданными амплитудами  $a_{0r}^{e-}$  ( $a_{Li(i \neq r)}^{e-} = 0$ ), то интегральные граничные условия имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial u(\rho, L)}{\partial z} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{jk_i^m}{h_{0i}} \rho J_1(\mu_{0i}\rho) \int_0^1 u(\bar{\rho}, L) J_1(\mu_{0i}\bar{\rho}) d\bar{\rho} &= 2jW \sum_p k_p^m a_{Lp}^{m-} \rho J_1(\mu_{0p}\rho), \\ \frac{\partial v(\rho, L)}{\partial z} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{jk_i^e}{e_{0i}} \rho J_1(\nu_{0i}\rho) \int_0^1 v(\bar{\rho}, L) J_1(\nu_{0i}\bar{\rho}) d\bar{\rho} &= 2jW \sum_r k_r^e a_{Lr}^{e-} \rho J_1(\nu_{0r}\rho). \end{aligned} \quad (20)$$

Заметим, что при условии полного согласования в выходном сечении  $z = L$  набегающие справа волны отсутствуют и  $a_{Lp}^{m-} = 0$ ,  $a_{Lr}^{e-} = 0$ . При получении условий (19), (20) учтены наряду с распространяющимися и закрытые волны, которые присутствуют вблизи перегородки. В связи с этим их можно ставить достаточно близко от границ перегородки, что позволяет значительно уменьшить расчетную область, особенно вблизи границы полосы прозрачности.

Таким образом, для системы уравнений (8) получена краевая задача в области  $D = \{0 < \rho < 1; 0 < z < L\}$  с условиями на стенке и на оси волновода (17), (18), а также с условиями излучения на начальном и выходном сечениях волновода (19), (20). Ввиду того что коэффициенты системы (8) имеют разрывы первого рода, при ее решении сеточным методом блочной матричной прогонки используется однородная конечноразностная схема, учитывающая непрерывность потока электромагнитной энергии на границах разрыва.

## 6. Коэффициенты отражения и прохождения по мощности

Для тестирования бианизотропных материалов представляет интерес исследование потоков электромагнитной энергии вдоль волновода с перегородкой и распределение энергии по поляризациям.

Мощность энергии, проходящей через поперечное сечение  $z$  волновода внутри бианизотропно-гиротропной перегородки, определяется формулой

$$P_s(z) = \operatorname{Re} \int_0^1 \left[ \dot{\vec{E}} \times \dot{\vec{H}}^* \right]_{\perp z} \rho d\rho = P_s^m(z) + P_s^e(z) =$$

$$= \operatorname{Re} \int_0^1 \left( \frac{j}{g_1 W} \left( \varepsilon_1 \frac{\partial u}{\partial z} + \chi_{e1} \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \alpha_{21} u - \alpha_{22} v \right)^* u \frac{d\rho}{\rho} + \operatorname{Re} \int_0^1 \left( \frac{j}{g_1 W} \left( \chi_{h1} \frac{\partial u}{\partial z} + \mu_1 \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \alpha_{11} u - \alpha_{12} v \right) v^* \frac{d\rho}{\rho},$$
(21)

где \* – знак сопряжения.

Вне перегородки мощности  $H$ - и  $E$ -волн разделяются:

$$P_s^m(z) = \frac{1}{W} \operatorname{Im} \int_0^1 u \frac{\partial u^*}{\partial z} \frac{d\rho}{\rho}, \quad P_s^e(z) = -\frac{1}{W} \operatorname{Im} \int_0^1 \frac{\partial v}{\partial z} v^* \frac{d\rho}{\rho},$$
(22)

где  $P_s^m(z)$  – мощность  $H$ -волны,  $P_s^e(z)$  – мощность  $E$ -волны,  $P_s(z) = P_s^m(z) + P_s^e(z)$ .

Определим мощности:  $P_0^+$  – мощность поданной на сечение  $z = 0$  волны, энергия которой движется в положительном направлении оси  $0z$ ;  $P_0^-$  – мощность отраженной волны, проходящей сечение  $z = 0$  в отрицательном направлении оси  $0z$ . Имеют место соотношения  $P_s(0) = P_0^+ - P_0^-$ ,  $P_0^+ = P_0^{m+} + P_0^{e+} = W \sum_p \left| a_{0p}^{m+} \right|^2 k_p^m h_{0p} + W \sum_r \left| a_{0r}^{e+} \right|^2 k_r^e e_{0r}$ , где суммирование производится по распространяющимся волнам.

Коэффициент отражения по мощности  $K_0$  при полном согласовании на выходе волновода (при  $z = L$ ,  $a_{Lr}^{e-} = 0$ ,  $a_{Lp}^{m-} = 0$ ) вычисляется теперь по формуле

$$K_0 = K_{0u} + K_{0v} = P_0^- / P_0^+ = 1 - P_s(0) / P_0^+.$$
(23)

Если на вход подается одна парциальная  $H$ -волна, то  $K_{0u} = 1 - P_s^m(0) / P_0^+$ ,  $K_{0v} = -P_s^e(0) / P_0^+$ .

Если на вход подается одна  $E$ -волна, то  $K_{0u} = -P_s^m(0) / P_0^+$ ,  $K_{0v} = 1 - P_s^e(0) / P_0^+$ .

Коэффициент прохождения по мощности  $K_{\Pi}$  вычисляется следующим образом:

$$K_{\Pi} = K_{\Pi u} + K_{\Pi v} = P_s(L) / P_0^+, \quad K_{\Pi u} = P_s^m(L) / P_0^+, \quad K_{\Pi v} = P_s^e(L) / P_0^+.$$
(24)

## 7. Вычислительный эксперимент

Описанная выше методика реализована в виде программного комплекса, позволяющего рассчитывать процессы прохождения и отражения симметричных электромагнитных  $H$ - и  $E$ -полей заданной частоты через азимутально-симметричную бианизотропную перегородку с заданными материальными комплексными коэффициентами и выполнять оптимизацию пара-

метров по заданным критериям, например минимизировать коэффициент прохождения одной волны при максимизации коэффициента прохождения другой. Расчеты проводились в безразмерных переменных (2), в частности геометрические размеры задавались в единицах  $\lambda_0/(2\pi)$ , поэтому результаты можно масштабировать на любую требуемую частоту.

Рассмотрен волновод с плоской перегородкой (рис. 1). Радиус волновода  $b$  задавался таким образом, чтобы обеспечить одномодовый режим распространения  $H_{01}$ - и  $E_{01}$ -волн ( $\mu_{01} = 3,83 < b < \nu_{02} = 5,52$ ). На входе ( $z = 0$ ) задавалась  $H_{01}$ -волна единичной амплитуды, т. е. в (19)  $a_{01}^{m+} = 1$ ,  $p = 1$ ,  $r = 0$ . Для выходного сечения ( $z = L$ ) в (20) задавалось условие полного согласования. Для выяснения влияния условий поглощения в стенке волновода в области перегородки расчеты проводились для значений удельной электрической проводимости стенки в диапазоне от  $\sigma' = 5,7 \cdot 10^7$  сим/м (медь) до  $\sigma' = 10^3$  сим/м,  $\mu_s = 1$ ,  $\epsilon_1 = 1$ .

Выполненные тестовые расчеты для биизотропной перегородки (в этом случае тензоры материальных коэффициентов (1) имеют только по три одинаковых диагональных элемента) при  $\sigma' > 10^6$  сим/м полностью повторяют результаты статьи [17], в которой показана возможность практически полного преобразования симметричной  $H_{01}$ -волны в  $E_{01}$ -волну и наоборот с помощью перегородки из кирального материала. Такие устройства могут быть востребованы, например, в выходной секции черенковских генераторов для преобразования полученной мощности СВЧ в виде симметричной  $E_{01}$ -волны в  $H_{01}$ -волну, более удобную для последующего использования. Однако композитные киральные материалы еще только находятся в стадии разработки.

Среди гиротропных материалов, описываемых тензорами (1), в настоящее время хорошо освоена технология изготовления ферритовых диэлектриков, которые получили широкое использование в технике СВЧ [31]. Рассмотрим перегородку (см. рис. 1) из феррита, помещенного в продольное постоянное магнитное поле  $\vec{H}_0 = H_0 \vec{z}_0$ , постоянная намагниченность которого  $\vec{M}_0 = \chi_m H_0 \vec{z}_0$ . По отношению к переменному полю электромагнитной волны материальные тензоры (1) внутри такой перегородки без учета поглощения имеют вид [6 (с. 510), 31]

$$\vec{\chi}_e = 0; \vec{\chi}_h = 0; \vec{\epsilon} = \epsilon_m I; \vec{\mu} = \begin{bmatrix} \mu_T & -j\alpha & 0 \\ j\alpha & \mu_T & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (25)$$

где  $\mu_T = 1 - \frac{\Omega_0^2 \chi_m}{W^2 - \Omega_0^2}$ ,  $\alpha = \frac{W \Omega_0 \chi_m}{W^2 - \Omega_0^2}$ ;  $\Omega_0 = \frac{\gamma H_0}{\omega_0}$  – относительная собственная частота прецессии,  $\gamma = \mu_0 e / m = 2,21 \cdot 10^5$  м А<sup>-1</sup> с<sup>-1</sup> – гиромангнитная постоянная;  $e$ ,  $m$  – заряд и масса электрона.

Безразмерные значения  $W$ ,  $\Omega_0$ ,  $\chi_m$ ,  $\epsilon_m$  определяют параметры феррита на заданной рабочей частоте  $\omega$  и величину поля  $H_0$ . Учесть объемное поглощение внутри феррита можно, положив  $\Omega_0$  комплексным [6].

Как показали расчеты, прохождение набегающей слева  $H_{01}$ -волны через перегородку толщиной  $L_{12} = z_2 - z_1$  сопровождается ее преобразованием в две отраженные и две проходящие  $H_{01} + E_{01}$  волны. Такое преобразование полностью определяется рассчитываемыми по формулам (23), (24) коэффициентами отражения  $K_{0u}$ ,  $K_{0v}$  и прохождения  $K_{1u}$ ,  $K_{1v}$  волн.

Особый интерес представляют условия, при которых реализуется по возможности полное преобразование одного типа волны в другой, например  $H_{01}$ - волны в  $E_{01}$ -волну. Для нахождения этих условий для заданных  $b$  и  $W = 1$  с использованием метода оптимизации подбирались параметры  $\Omega_0$ ,  $\chi_m$ ,  $\epsilon_m$ ,  $L_{12}$ , при которых достигается максимум коэффициента прохождения  $E$ -волны  $K_{1v}$  при минимальных значениях  $K_{0u}$ ,  $K_{0v}$  и  $K_{1u}$ . Расчеты показали, что такое преобразование возможно с КПД порядка 95–97 % при множестве различных комбинаций значений  $\Omega_0$ ,  $\chi_m$ ,  $\epsilon_m$ ,  $L_{12}$ . Это позволяет при подборе параметров преобразователя довольно широко варьировать физические параметры используемых ферритов и величину постоянного магнитного поля. Для толщины перегородки, как правило, не превосходящей диаметра волновода  $2b$ , заметное влияние поглощения в стенке начинается со значений  $\sigma'$ , меньших  $10^4$  сим/м.

На рис. 2 приведены характеристики (11), (21), (23), (24) прохождения  $H_{01}$ -волны для одного из найденных вариантов параметров ферритовой перегородки, в котором при  $W = 1$ ,  $b = 4,66$ ,  $\sigma' = 10^3$ ,  $\Omega_0 = 0,81$ ,  $\chi_m = 0,12$ ,  $\varepsilon_m = 5$ ,  $L_{12} = 4,33$ ,  $\alpha = 0,28$ ,  $\mu_T = 0,77$  получено  $K_{0u} = 0,044$ ,  $K_{0v} = 0,0006$ ,  $K_{\Pi u} = 0,005$ ,  $K_{\Pi v} = 0,86$  (вариант 1). Для частоты волны  $f = \omega/2\pi \cong 10$  ГГц радиус волновода  $b' = 2,33$  см, толщина перегородки  $L'_{12} = 2,16$  см,  $H_0 \approx 230$  кА·м<sup>-1</sup>,  $M_0 \approx 28$  кА·м<sup>-1</sup>.

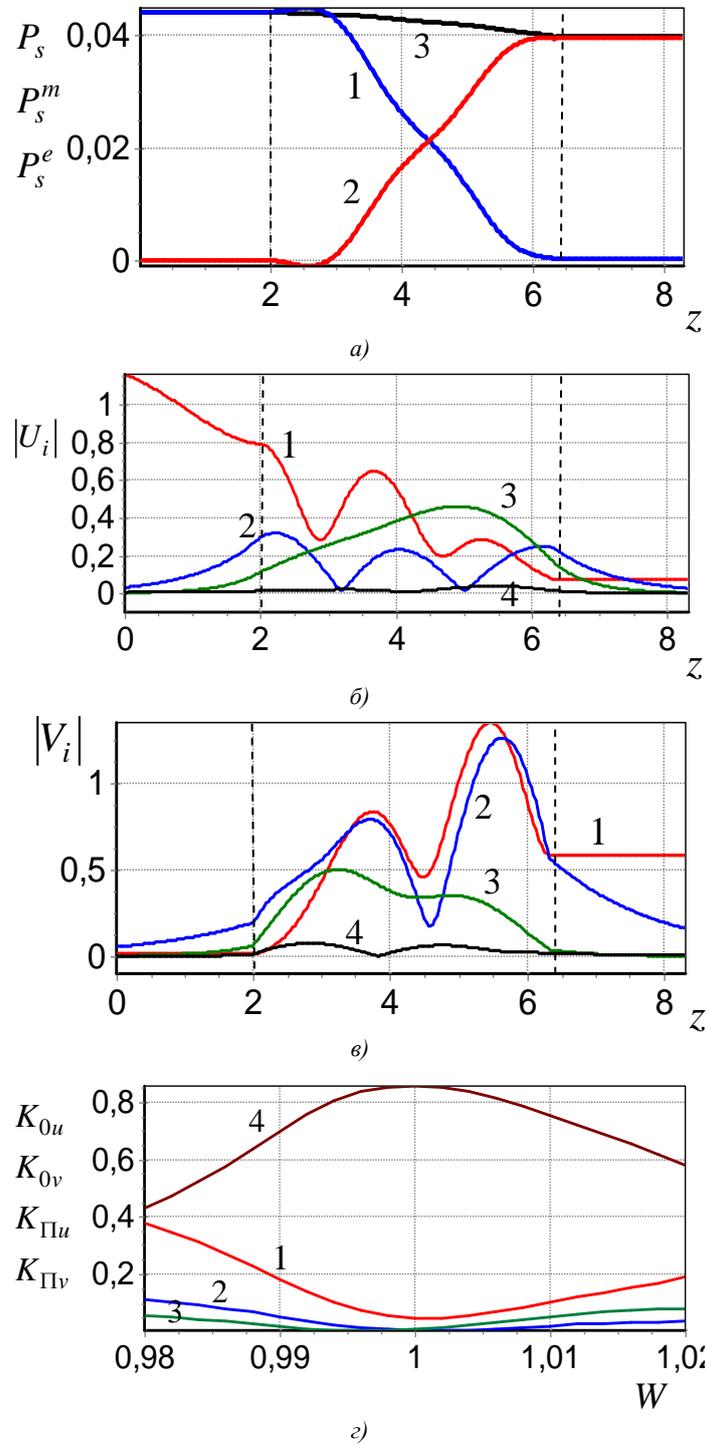


Рис. 2. Характеристики волны при прохождении через перегородку: а) 1 –  $P_s^m$ , 2 –  $P_s^e$ , 3 –  $P_s$ ; б) 1, 2, 3, 4 –  $|\dot{U}_{1,2,3,4}|$ ; в) 1, 2, 3, 4 –  $|\dot{V}_{1,2,3,4}|$ ; г) 1 –  $K_{0u}$ , 2 –  $K_{0v}$ , 3 –  $K_{\Pi u}$ , 4 –  $K_{\Pi v}$

В данном варианте при КПД преобразования 86 % практически отсутствует проходящая  $H_{01}$ -волна, зато в отраженной волне ее доля составляет примерно 5 %. Пунктиром на рис. 2, *а-в* показаны границы перегородки. Как видно из рис. 2, *а*, в оптимальном режиме мощность падающей  $H_{01}$ -волны внутри перегородки плавно убывает (кривая 1) с одновременным возрастанием мощности  $E_{01}$ -волны (кривая 2). Суммарная мощность (кривая 3) убывает в соответствии с потерями в стенке волновода, которые в данном варианте составляют примерно 9 %. На рис. 2, *б, в* показаны зависимости от  $z$  модулей коэффициентов разложения суммарного поля по мембранным функциям собственных волн регулярного волновода (13), (14), представляющих фактически величины амплитуд парциальных собственных волн  $H_{0i}$ ,  $E_{0i}$  в сечении  $z$ . Первая парциальная волна (с индексом 1) распространяющаяся, остальные – закритические. На рис. 2 видно, что преобразование имеет резонансный характер и сопровождается интенсивным возбуждением закритических мод внутри перегородки. Благодаря переотражению волны от границ перегородки, если ее толщина кратна примерно половине длины волны в волноводе, заполненном диэлектрическим материалом, возможен эффект преобразования при незначительном отражении [15, 17]. В рассмотренном варианте толщина перегородки равна примерно трем полуволнам. Ход кривой 1 перед перегородкой на рис. 2, *б* указывает на наличие отраженной  $H_{01}$ -волны. При более длинном отрезке  $[0 \dots z_1]$  здесь наблюдаются характерные для суммы прямой и встречной волн «биения» амплитуды.

На рис. 2, *г* представлены полосовые характеристики полученного преобразователя симметричных типов волн. Видно, что эффективное преобразование реализуется в полосе примерно 2 %. Однако, если за счет изменения  $H_0$  компенсировать изменение  $W$ , полосу можно существенно расширить.

Рассмотренный выше вариант соответствует случаю  $\Omega_0 < W$ , т. е. частота волны немного превосходит частоту прецессии. В варианте 2 при  $b = 4,73$ ,  $\sigma' = 2 \cdot 10^3$ ,  $W = 1$ ,  $\Omega_0 = 1,17$ ,  $\chi_m = 0,13$ ,  $\epsilon_m = 5$ ,  $L_{12} = 4,24$ ,  $\alpha = -0,41$ ,  $\mu_T = 1,48$  получено  $K_{0u} = 0,057$ ,  $K_{0v} = 0,0008$ ,  $K_{1u} = 0,004$ ,  $K_{1v} = 0,84$ . Например, для частоты волны  $f = \omega/2\pi \cong 10$  ГГц радиус волновода  $b' = 2,36$  см, толщина перегородки  $L'_{12} = 2,12$  см,  $H_0 \approx 332$  кА·м<sup>-1</sup>,  $M_0 \approx 43$  кА·м<sup>-1</sup>.

Как следует из сравнения характеристик преобразования, наблюдается значительное различие в спектрах возбуждаемых парциальных волн. Полоса частот преобразователя варианта 2 увеличена почти вдвое по сравнению с вариантом 1. Потери в стенке составляют примерно 9 %, при том что  $\sigma'$  вдвое больше.

Расчеты показали, что при обратном преобразовании, когда на вход подается  $E_{01}$ -волна, достигаются примерно те же характеристики, однако распределения амплитуд парциальных волн существенно отличаются.

Другой известной гиротропной средой, описываемой тензорами (1), является подмагниченная плазма. Рассмотрим перегородку (см. рис. 1) из плазмы, помещенной в продольное постоянное магнитное поле  $\vec{H}_0 = H_0 \vec{z}_0$ . По отношению к переменному полю электромагнитной волны материальные тензоры (1) внутри такой плазмы без учета поглощения имеют вид [6, с. 508]

$$\vec{\chi}_e = 0; \vec{\chi}_h = 0; \vec{\mu} = I; \vec{\epsilon} = \begin{bmatrix} \epsilon_T & -j\beta & 0 \\ j\beta & \epsilon_T & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_L \end{bmatrix}, \quad (26)$$

где  $\epsilon_T = 1 - \frac{\omega_{p0}^2}{W^2 - \omega_{p0}^2}$ ,  $\beta = \frac{\omega_{p0}^2 \Omega_0}{W(W^2 - \Omega_0^2)}$ ,  $\epsilon_L = 1 - \frac{\omega_{p0}^2}{W^2}$ ,  $\Omega_0 = \frac{\mu_0 |e| H_0}{m \omega_0}$  – относительная частота

Лармора;  $\omega_{p0} = \frac{|e|}{\omega_0} \sqrt{\frac{N}{\epsilon_0 m}}$  – относительная плазменная частота;  $N$  – количество электронов в м<sup>3</sup>. При учете поглощения все матричные коэффициенты будут комплексными.

Расчеты показали, что в преобразователе на основе подмагниченной плазмы может быть достигнут больший КПД, чем в ферритовом.

### Заключение

В статье предложена и реализована численно методика решения краевой задачи дифракции симметричных волн на плоской азимутально-симметричной неоднородной перегородке из специальных бианизотропных материалов в волноводе, которые охватывают широкий круг практически используемых гиротропных материалов. Рассмотрена краевая задача с импедансными граничными условиями на стенке волновода, что позволило исследовать влияние материала стенок волновода на прохождение волн через перегородку. Эффективность данной методики обусловлена сведением векторной задачи для уравнений Максвелла к двумерной краевой задаче для связанной системы двух скалярных эллиптических уравнений, что позволяет решить ее прямым (неитерационным) сеточным методом блочной матричной прогонки. При этом использование однородных разностных схем позволяет достаточно просто реализовать условия на поверхности раздела различных сред. Методика применима для неоднородной перегородки, в частности слоистой, из поглощающих материалов.

Обнаруженный в результате вычислительного эксперимента эффект практически полного преобразования симметричной  $H_{01}$ -волны в  $E_{01}$ -волну и наоборот на перегородках из феррита и подмагниченной плазмы указывает на возможность создания простого и эффективного преобразователя типов симметричных волн круглого волновода на основе композитных материалов. Для толщины перегородки, не превосходящей диаметр волновода, заметное влияние поглощения в стенке начинается со значений  $\sigma'$ , меньших  $10^4$  сим/м. Рассчитанные варианты преобразователей могут найти применение при создании методов измерения параметров гиротропных материалов.

### Список литературы

1. Виноградов, А.П. Электродинамика композитных материалов / А.П. Виноградов. – М. : Эдиториал УРСС, 2001. – 206 с.
2. Федоров, Ф.И. Теория гиротропии / Ф.И. Федоров. – Минск : Наука и техника, 1976. – 456 с.
3. Потехин, А.И. Излучение и распространение электромагнитных волн в анизотропной среде / А.И. Потехин. – М. : Наука, 1971. – 76 с.
4. Гуляев, Ю.В. Метаматериалы: фундаментальные исследования и перспективы применения / Ю.В. Гуляев, А.Н. Лагарьков, С.А. Никитов // Вестник Российской академии наук. – 2008. – Т. 78, № 5. – С. 438–457.
5. Иванов, О.В. Распространение электромагнитных волн в анизотропных и бианизотропных слоистых структурах / О.В. Иванов. – Ульяновск : УлГТУ, 2010. – 262 с.
6. Никольский, В.В. Электродинамика и распространение радиоволн / В.В. Никольский, Т.И. Никольская. – М. : Наука, 1989. – 544 с.
7. Жук, Н.П. Скаляризация электромагнитного поля в произвольно-анизотропной плоскостойкой среде / Н.П. Жук // Радиотехника и электроника. – 1994. – Т. 39, № 11. – С. 1706–1715.
8. Евельсон, Р.Л. Метод решения задачи о распространении электромагнитных волн в многослойной плоскостойкой поглощающей анизотропной магнитодиэлектрической среде / Р.Л. Евельсон // Радиотехника и электроника. – 2000. – Т. 45, № 8. – С. 918–925.
9. Бодров, В.В. Матрица передачи анизотропного слоя / В.В. Бодров, В.И. Сурков // Радиотехника и электроника. – 1995. – Т. 40, № 6. – С. 864–869.
10. Ерофеев, В.Т. Решение задачи о прохождении плоских электромагнитных волн через бианизотропную неоднородную пластину / В.Т. Ерофеев, А.К. Сеницын // Информатика. – 2013. – № 2. – С. 11–21.
11. Кураев, А.А. Электродинамика и распространение радиоволн / А.А. Кураев, Т.Л. Попкова, А.К. Сеницын. – М. : Инфра-М, 2013. – 423 с.

12. Курушин, Е.П. Электродинамика анизотропных волноведущих структур / Е.П. Курушин, Е.И. Нефедов. – М. : Наука, 1980. – 223 с.
13. Моденов, В.П. Задача дифракции электромагнитных волн на биизотропном включении в цилиндрическом волноводе / В.П. Моденов, А.В. Ромашин // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2005. – Т. 10, № 8. – С. 23–28.
14. Каценеленбаум, Б.З. Преобразование линейной поляризации в круговую / Б.З. Каценеленбаум // Радиотехника и электроника. – 2010. – Т. 55, № 9. – С. 1148.
15. Кураев, А.А. Расчет параметров диэлектрической диафрагмы круглого волновода, не отражающей волну / А.А. Кураев, О.И. Наранович, А.К. Сеницын // Техника и приборы СВЧ. – 2008. – № 1. – С.10–15.
16. Ерофеенко, В.Т. Методика расчета задачи дифракции симметричных волн на биизотропной перегородке в цилиндрическом волноводе / В.Т. Ерофеенко, А.К. Сеницын // Известия НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2012. – № 4. – С. 104–110.
17. Ерофеенко, В.Т. Преобразование типов симметричных волн на биизотропной перегородке в цилиндрическом волноводе / В.Т. Ерофеенко, А.К. Сеницын // Радиотехника и электроника. – 2013. – Т. 58, № 7. – С. 670–678.
18. Леонтович, М.А. О приближенных граничных условиях для электромагнитного поля на поверхности хорошо проводящих тел. Исследования по распространению радиоволн : в двух частях / М.А. Леонтович. – М.-Л. : Изд-во АН СССР, 1948. – Ч. 2 – С. 5–12.
19. Аполлонский, С.М. Импедансные граничные условия на анизотропных телах / С.М. Аполлонский, В.Т. Ерофеенко // Электричество. – 1995. – № 4. – С. 68–72.
20. Преображенский, А.П. Импедансные граничные условия в задаче рассеяния электромагнитных волн на полости с радиопоглощающими покрытиями / А.П. Преображенский // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2006. – Т. 11, № 2. – С. 61–63.
21. Ерофеенко, В.Т. Импедансные граничные условия для краевых задач дифракции на поверхностях многослойных композитных структур / В.Т. Ерофеенко // Известия НАН Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. – 2011. – № 3. – С. 40–46.
22. Кравченко, В.Ф. Об импедансных граничных условиях Леонтовича, учитывающих кривизну поверхности / В.Ф. Кравченко, В.Т. Ерофеенко // Радиотехника и электроника. – 2000. – Т. 45, № 11. – С. 1300–1306.
23. Ланеев, Е.Б. Импедансные граничные условия для нестационарной дифракции / Е.Б. Ланеев // Методы вычислительной электродинамики. – М. : Изд-во МГУ, 1981. – С. 93–98.
24. Аполлонский, С.М. Обобщение импедансных граничных условий Леонтовича для нестационарных полей / С.М. Аполлонский, В.Т. Ерофеенко // Электричество. – 1993. – № 12. – С. 64–67.
25. Урев, М.В. Граничные условия для уравнений Максвелла в случае произвольной зависимости от времени / М.В. Урев // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1997. – Т. 37, № 12. – С. 1489–1497.
26. Ерофеенко, В.Т. Аналитическое моделирование в электродинамике / В.Т. Ерофеенко, И.С. Козловская. – Минск : БГУ, 2010. – 304 с.
27. Ерофеенко, В.Т. Моделирование воздействия электромагнитных импульсов на полупространство с помощью интегральных граничных условий / В.Т. Ерофеенко, С.Д. Прийменко // Компьютерное моделирование в наукоемких технологиях : тр. Междунар. науч.-техн. конф. (КМНТ–2014), Харьков, Украина, 28–31 мая 2014 г. – Харьков : Харьковский нац. ун-т, 2014. – С. 178–140.
28. Наранович, О.И. Решение двумерного уравнения эллиптического типа методом блочной матричной прогонки / О.И. Наранович, А.К. Сеницын // Доклады БГУИР. – 2007. – № 3 (19). – С. 18–23.
29. Свешников, А.Г. Принцип излучения / А.Г. Свешников // Докл. АН СССР. – 1950. – Т. 3, № 5. – С. 517–520.
30. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и таблицами / под ред. М. Абрамовица, И. Стиган. – М., 1979. – 830 с.

31. Малков, Н.А. Гиротропные среды в технике СВЧ / Н.А. Малков. – Тамбов : ТГТУ, 2005. – 80 с.

Поступила 03.06.2014

<sup>1</sup>Учреждение БГУ «НИИ прикладных проблем математики и информатики»,  
Минск, пр. Независимости, 4  
e-mail: [bsu\\_erofeenko@tut.by](mailto:bsu_erofeenko@tut.by)

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
Минск, ул. П. Бровки, 6  
e-mail: [sinitsyn@cosmostv.by](mailto:sinitsyn@cosmostv.by)

**V.T. Erofeenko, A.K. Sinitsyn**

**TRANSMISSION OF THE SYMMETRIC WAVES THROUGH  
A BIANISOTROPIC-GYROTROPIC DIAPHRAGM IN THE CIRCULAR  
WAVEGUIDE WITH THE IMPEDANCE BOUNDARY CONDITIONS**

A technique for the solution of the boundary-value problem of transmission of partial symmetric E- and H-polarized waves of a circular regular waveguide that has a perfectly conducting boundary and contains an azimuthing symmetric inhomogeneous diaphragm made from bianisotropic-gyrotropic materials and with a impedance boundary conditions in region of diaphragm is developed. The boundary-value problem reduces to the numerical solution of a system of equations with the partial derivatives for two scalar potentials. Conditions providing for the transformation of  $H_{01}$ -wave into  $E_{01}$ -wave under the transmission through a plane diaphragm having various bianisotropy property and absorption of electromagnetic energy in the wall of waveguide are analyzed.

УДК 531/534: [57+61]; 616.713:616.12-089

Ю.Г. Кузьминский, С.В. Шилько

## МЕТОД ДИАГНОСТИКИ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ОДНОМЕРНОЙ МОДЕЛИ ГЕМОДИНАМИКИ

*Описывается метод первичной диагностики состояния сердечно-сосудистой системы с использованием оригинального программного обеспечения, реализующего математический анализ осциллометрических данных на основе одномерной биомеханической модели гемодинамики. Проводимый предложенным методом скрининг позволяет расширить возможности классической осциллометрии и получить важную информацию о состоянии сердца и сосудов, включая оценку адаптационных возможностей обследуемых (в частности, спортсменов) при различных физиологических нагрузках.*

### Введение

Хорошо известно, что по статистике в ряду причин смертности первое место устойчиво занимают болезни сердечно-сосудистой системы (ССС), а среди трудоспособного мужского населения эти заболевания приводят к каждому третьему случаю летального исхода [1]. Многоуровневая и надежная регуляция названной системы организма обеспечивает ее адаптацию к разнообразным физиологическим нагрузкам. Негативным следствием функционирования мощных механизмов адаптации ССС является то, что деструктивные изменения сердца и сосудов накапливаются в так называемый период донозологического состояния, клинически не проявляясь в течение определенного времени. В этой связи необходимы инструментальные методы [2] быстрого и неинвазивного первичного контроля для своевременного выявления (скрининга) и профилактики кардиопатологий, что особенно актуально для освидетельствования трудоспособности и профпригодности работников транспортной отрасли [3], силовых структур [4, 5] и спортсменов [6, 7]. Авторы считают, что осциллометрия как один из наиболее информативных методов тонометрии, дополненная биомеханическим анализом результатов измерений, позволяет разрабатывать весьма эффективные средства диагностики гемодинамики и получать объективные показатели состояния сердца и сосудов, включая оценку адаптационных возможностей ССС.

Многие закономерности деятельности ССС еще далеки от окончательного понимания. Так, для программно-аппаратной реализации рассматриваемого диагностического подхода необходимо формализовать механизмы регуляции кровообращения, обсуждаемые в работах по физиологии и биомеханике ССС, например в [8–14]. К ним относятся:

- саморегуляция просвета (проницаемости) магистральных и прекапиллярных кровеносных сосудов как функция кислотности, содержания кислорода и адреналина в биотканях и т. д.), включающая мышечную (сфинктерную) регуляцию тока крови;
- центральная регуляция (изменение периода сокращения сердца и периферического сопротивления посредством барорецепторов, изменение тонуса сосудов в зависимости от артериального давления, рефлекторная регуляция тканевого кровотока);
- вегетативная и гормональная регуляция.

Особенности моделирования ССС обусловлены спецификой геометрии сети сосудов, состава крови и реакций на физиологические нагрузки конкретного человека. Во многих известных моделях учитываются лишь некоторые из этих аспектов. В них, как правило, отсутствуют оценки значимости отдельных факторов в общей системе регуляции. В первую очередь это касается моделирования гемодинамики с учетом индивидуальности обследуемого. Ограниченность отдельно взятых, пусть и безусловно важных механизмов функционирования препятствует всестороннему и синергетическому описанию ССС. С позиций теории моделирования последняя может быть отнесена к адаптивным консервативным интеллектуальным системам [11]. Ее особенностями являются:

- невозможность изменения состава, структуры и связей компонентов, т. е. их «консервативность» (считается, что такие системы самодостаточны и идеально спроектированы);
- способность к адаптации путем перехода в различные состояния при изменении внешней среды;

- меж- и внутрииндивидуальная вариабельность реакций системы в однотипных условиях;
- наличие сложноорганизованного алгоритма принятия решений и передачи управляющих воздействий между компонентами;
- необходимость индивидуального представления, несмотря на типовой характер поведения компонентов и состав системы;
- трудность измерения характеристик в реальных условиях для анализа ситуации и построения математических моделей процессов из-за сложных и трудно разделяемых связей, отсутствия необходимых регистрирующих устройств при многообразии ситуаций и состояний.

В общем случае гидродинамические процессы в кровеносной системе могут быть описаны трехмерными нестационарными уравнениями Навье – Стокса со свободной границей для вязкой несжимаемой жидкости совместно с уравнениями динамики эластичных оболочек сосудов. Их численное решение и последующий параметрический анализ связаны с большими вычислительными и временными затратами, поэтому многомерные модели для описания гемодинамики всей сети сосудов на практике не применяют, ограничиваясь описанием локального кровотока путем решения систем дифференциальных уравнений для различных моментов времени в отдельных точках. Кроме того, закономерности влияния значительного числа быстро изменяющихся параметров физической нагрузки [15], биохимических показателей крови [16] и т. д. на тонус сосудов и реологические характеристики крови в настоящее время не формализованы. Большое число технических средств, разработанных для диагностики ССС и упомянутых в табл. 1, объясняется многообразием способов получения первичной информации и сфер применения. Общим признаком является использование компьютеров, работающих в операционной среде Windows. Ценовой интервал подобных приборов на рынке стран СНГ – от 50 до 150 тыс. рос. руб. Наряду с указанными стационарными и достаточно дорогими программно-аппаратными комплексами появляются диагностические приложения для андроидных смартфонов, которые реализуют лишь простейшие тонометрические методики.

Таблица 1

Характеристики известных программно-аппаратных комплексов

Изделие, разработчик, год выпуска, литературный источник	Аппаратная часть	Входная информация	Выходные параметры	Применение
Программно-аппаратный комплекс исследования функционального состояния организма «Омега-М», А.Е. Бессонов, Россия, Зеленоград, 2002 [17]	Модуль многоканальный регистрации ЭКГ	Кардиограмма	Вариабельность сердечного ритма	Стационар
Автоматизированное рабочее место исследования центральной гемодинамики (АРМ ЦГД), А.М. Сударев, Россия, Москва, 2003 [18]	Интерфейс тахоосциллоскопа	Тонометрия, ручная эхография кровотока	40 параметров гемодинамики	Поликлиника
Аппаратно-программный комплекс неинвазивного исследования центральной гемодинамики методом объемной компрессионной осциллометрии «Глобус», Г.А. Старков, Россия, Белгород, 2004 [19]	USB-интерфейс тонометра	Массив данных опроса тонометрического датчика давления	ЧСС, пять параметров давления, семь параметров объемного кровотока, пять параметров сосудов	Поликлиника
Аппаратно-программный комплекс «Истоки здоровья» (My Body), Ю.П. Баландин, Россия, Рязань, 2004 [20]	USB-интерфейс, весы, ростомер, динамометр, кардиодатчик, кардиоприемник, калипер, спирометр	Кардиограмма, частота сердечных сокращений (ЧСС), объем легких, мышечное усилие, анкета	Группа тестовых индексов	Поликлиника (локальное и сетевое использование)
Осциллометрический анализатор параметров сердечного выброса и артериального давления «АПКО-8-РИЦ» И.В. Цупко, Россия, Казань, 2006 [21, 22]	Интерфейс тонометра	Массив данных опроса тонометрического датчика давления	ЧСС, шесть параметров давления, четыре параметра объема кровотока, девять параметров сосудов	Поликлиника

Окончание табл. 1

Изделие, разработчик, год выпуска, литературный источник	Аппаратная часть	Входная информация	Выходные параметры	Применение
Cardiovascular Management System «SphygmoCor», Abram J., Австралия, 2008 [23]	Интерфейс трехточечных тонометров	Массив данных опроса тонометрического датчика давления	Параметры давления, скорость пульсовой волны	Поликлиника
Система интегрального мониторинга «Симона-111», А.А. Антонов, Россия, Москва, 2008 [24]	Интерфейс девяти типов датчиков	Данные опроса датчиков используемых методов измерений	41 параметр гемодинамики, 19 отклонений параметров от нормы, 4 параметра температуры, 23 параметра дыхания, 20 параметров метаболизма, 11 параметров биохимии	Стационар
Медицинский аппаратно-программный комплекс для неинвазивного анализа состава крови методом Мальхина – Пулавского «АМП-Успих», Украина, Харьков, 2009 [25]	USB-интерфейс датчиков температуры пяти точек поверхности тела, частоты пульса и дыхания	Температура тела, частота пульса и дыхания	117 биохимических параметров	Поликлиника
Аппаратно-программный комплекс «Ангиоскан», А.С. Парфенов, Россия, Сколково, 2011 [26]	Интерфейс фотоплетизмографа	Оптическая плотность биологической ткани	Состояние эндотелия, жесткость стенок сосудов, индекс аугментации, центральное артериальное давление	Поликлиника
Кардиологический комплекс, А.В. Фролов, Беларусь, Минск, 2011 [27]	Сканер сетчатки, СКИФ	Изображение сетчатки глаза	Состояние ССС	Стационар

С учетом названных обстоятельств для проведения экономичной, но максимально информативной экспресс-диагностики состояния ССС необходимы иные, более рациональные подходы к описанию гемодинамики, позволяющие учитывать влияние и изменение значительного числа биохимических, биофизических и биомеханических факторов в режиме реального времени.

Целью настоящего исследования является формализация эффективного метода диагностики ССС на основе биомеханической модели [12], данных осциллометрии и его компьютерная реализация для быстрого и неинвазивного выявления кардиопатологий при массовом обследовании (скрининге) населения.

### 1. Формулировка задачи и алгоритм численного решения

Для достижения поставленной цели представляется перспективным моделирование гемодинамики ССС исходя из общего объема кровотока, усредненных геометрических и деформационных свойств сосудов, вязкости крови и условия баланса потребления кислорода. Перечисленные параметры отражаются на ЧСС и артериальном давлении (его систолическом и диастолическом значениях), измеряемых при стандартной тонометрии. Объем кровотока определяется физической и стрессовой нагрузками, уровнем содержания гемоглобина, артериовенозным градиентом (разницей содержания кислорода в артериальной и венозной крови) и уровнем аэробного энергообеспечения. В свою очередь, артериовенозный градиент по кислороду в основном определяется параметром кислотно-щелочного равновесия [28–35]. Предлагаемый подход можно классифицировать как одномерное моделирование гемодинамики [36–38].

Определение множества гемодинамических параметров исходя из ограниченного числа входных параметров приводит к следующим особенностям моделирования:

– использованию методов нелинейного программирования, предполагающих минимизацию невязок расчетных и экспериментально найденных значений параметров;

– необходимости учета быстрого изменения во времени параметров кислотности, вязкости, скорости пульсовой волны, деформации сосудов и систолического объема, параметров физической и стрессовой нагрузок.

Авторы считают, что целесообразно применять принцип обучаемости (индивидуальной настройки) диагностической программы по индивидуальным параметрам гемодинамики обследуемого. При достаточно представительном анализе чувствительности и накоплении информации можно определить, каким образом каждый параметр влияет на конечный результат. В процессе формирования базы данных для различных временных лагов и при варьировании нагрузок конкретизируются показатели нормы и тип гемодинамики индивидуума. Таким образом, сопоставление решений в рамках относительно простой одномерной модели позволяет найти не только расчетные оценки, но и определить тенденции в функционировании ССС.

Первоначально была разработана математическая модель гемодинамики, ориентированная на использование входных данных, получаемых от стандартного тонометра, с компьютерной реализацией в виде программы БИОДИС [36–39] (табл. 2).

Таблица 2

Основные входные и выходные параметры математической модели и программы БИОДИС

Код	Наименование	Наименование (англ.)	Ед. измер.	Интервал измен.	Норма	Тип
<i>A</i>	Возраст	Age	лет	20–70	20	Входной
<i>H</i>	Рост	Height	см	120–220	170	–
<i>M</i>	Масса тела	Weight	кг	30–140	70	–
<i>L</i>	Нагрузка	Load	кДж	4–300	6	–
$F_{cc}$	Частота сердечных сокращений	Frequency of cardiac contractions	мин <sup>-1</sup>	30–200	60	–
$P_{max}$	Систолическое давление	Maximal pressure	мм рт. ст.	40–250	120	–
$P_{min}$	Диастолическое давление	Minimal pressure	мм рт. ст.	30–130	80	–
$V_m$	Минутный объем крови	Minute blood volume	л/мин	3–15	5	Выходной
$V_{sys}$	Систолический объем	Systolic volume	л	0,03–0,25	0,08	–
<i>pH</i>	Кислотное равновесие	Acidity parameter	безразм.	6,9–7,67	7,37	–
<i>Hb</i>	Содержание гемоглобина	Hemoglobin content	г/л	80–190	150	–
$\eta$	Кинематическая вязкость крови	Kinematic viscosity	сСт	1,9–12	5	–
$k_{str}$	Относительный уровень стрессовой нагрузки	Stress level	безразм.	0,8–1,3	1	–
$C_v$	Скорость пульсовой волны	Wave speed	см/с	300–900	470	–
<i>E</i>	Модуль упругости ткани стенок сосудов	Module of elasticity of walls of vessels	кПа	8–18	12	–
$k_d$	Коэффициент тонусной деформации сосудов	Vessel narrowing/expanding	безразм.	0,8–1,3	1	–
$k_{dil}$	Коэффициент упругой дилатации сосудов	Vessel dilatation	безразм.	1,0–1,3	1,16	–
$AB_{O_2}$	Артериовенозный градиент по кислороду в гемоглобине	Gradient $O_2$ in hemoglobin	%	12–72	20	–
$O_2$	Потребление кислорода	Oxygen uptake	мл/м	100–3000	250	–

При моделировании рассматривается следующая задача нелинейного программирования: минимизируя функционал в виде суперпозиции невязок с весовыми коэффициентами

$$m_{Hb} \left| 1 - \frac{Hb}{Hb_0} \right| + m_{pH} \left| 1 - \frac{pH}{pH_0} \right| + m_E \left| 1 - \frac{E}{E_0} \right| + m_{sys} \left| 1 - \frac{F_{cc}}{V_{sys}^0} \right| + m_{\eta} \left| 1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right| + m_d |1 - k_d| + m_{str} |1 - k_{str}| \rightarrow \min$$

по заданным значениям входных параметров  $X \equiv \{A, H, M, L, F_{cc}, P_{max}^0, P_{min}^0\}$ , найти выходные параметры (переменные)  $Y \equiv \{V_m, pH, Hb, k_{\eta}, E, k_{str}, k_d, P_{max}, P_{min}\}$ , варьируемые в области их допустимых значений

$$\left|1 - \frac{pH}{pH_0}\right| \leq S_{pH}, \quad \left|1 - \frac{Hb}{Hb_0}\right| \leq S_{Hb}, \quad \left|1 - \frac{E}{E_0}\right| \leq S_E, \quad |1 - k_{str}| \leq S_{str}, \quad |1 - k_\eta| \leq S_\eta, \quad |1 - k_d| \leq S_d,$$

с критерием точности  $|P_{\max} - P_{\max}^0| + |P_{\min} - P_{\min}^0| \leq \Delta_p$ .

В процедуре минимизации невязок используются адаптационные параметры весовых коэффициентов  $m_{xx}$ , пределов изменения искомых параметров  $S_{xx}$  и гемодинамических норм  $XX_0$ :

$$K_{opt} \equiv \{\Delta_P, P_{cap}, N, m_{Hb}, m_{pH}, m_\eta, m_{str}, m_{sys}, m_E, S_{pH}, S_{Hb}, S_E, S_{str}, S_\eta, S_d\};$$

$$Norma \equiv \left\{V_{sys}^0 = 70 \text{ мл}, pH_0 = 7,37, Hb_0 = 150 \text{ г/л}, \eta_0 = 5 \text{ сСт}, E_0 = 12 \cdot 10^5 \text{ Па}\right\},$$

которые были уточнены путем верификации модели по результатам 4000 расчетов.

Используются следующие функциональные зависимости параметров модели:

– вязкости крови от содержания гемоглобина  $Hb$ , параметра кислотного равновесия  $pH$ , уровня стрессовой нагрузки, коэффициентов  $a_{xx}^n$  параболических аппроксимаций зависимостей вязкости от  $Hb$  и  $pH$ , коэффициента  $k_\eta$  линейной аппроксимации зависимости вязкости от уровня стрессовой нагрузки  $k_{str}$ :

$$\eta = \left( (1 - k_\eta) + k_\eta \cdot k_{str} \right) \cdot \left( a_{Hb}^0 + a_{Hb}^1 \left( \frac{Hb}{Hb_0} \right) + a_{Hb}^2 \left( \frac{Hb}{Hb_0} \right)^2 \right) \cdot \left( a_{pH}^0 + a_{pH}^1 \left( \frac{pH}{pH_0} \right) + a_{pH}^2 \left( \frac{pH}{pH_0} \right)^2 \right) \eta_0;$$

– минутного объема крови от нагрузки, массы тела, градиента содержания кислорода в артериальной и венозной крови  $AB_{O_2}$ , содержания гемоглобина и уровня стрессовой нагрузки:

$$V_{mv} = k_{str} \cdot L \cdot \frac{M}{70} \cdot \frac{101,97}{2,06} \cdot \frac{20}{Hb_0} \cdot Hb \cdot AB_{O_2};$$

– градиента содержания кислорода от параметра кислотного равновесия и соответствующего парциального давления газов:

$$AB_{O_2} = 10 \cdot \left( \frac{1}{1 + \left( \frac{\left( 27 \cdot 10^{-0,5(pH-pH_0)} + \left( 0,00003 \left( \frac{y_o^0 - y_o^1(7,37-pH)}{10^{pH-7,6}} \right)^3 - 0,006 \left( \frac{y_o^0 - y_o^1(7,37-pH)}{10^{pH-7,6}} \right)^2 + 0,6357 \frac{y_o^0 - y_o^1(7,37-pH)}{10^{pH-7,6}} + 12,1223 - 29,87 \right) \right)^{2,8}}{140 - \frac{y_o^0 - y_o^1(7,37-pH)}{10^{pH-7,6}}} \right)} \right);$$

$$AB_{O_2} = 10 \cdot \left( \frac{1}{1 + \left( \frac{\left( 27 \cdot 10^{-0,5(pH-pH_0)} + \left( 0,00003 \left( \frac{y_o^0 - y_o^1(7,37-pH)}{10^{pH-7,6}} \right)^3 - 0,006 \left( \frac{y_o^0 - y_o^1(7,37-pH)}{10^{pH-7,6}} \right)^2 + 0,6357 \frac{y_o^0 - y_o^1(7,37-pH)}{10^{pH-7,6}} + 12,1223 - 29,87 \right) \right)^{2,8}}{80 - \frac{y_o^0 - y_o^1(7,37-pH)}{10^{pH-7,6}}} \right) \right);$$

– модуля упругости ткани стенок сосудов и скорости распространения пульсовой волны от деформации сосудов, а также коэффициентов  $b_x^x$  линейной зависимости модуля упругости от деформации сосудов:

$$E = 10^5 \left( b_e^0 E_0 + b_e^1 |1 - k_d| \right),$$

$$C_v = \frac{100}{\sqrt{1000\rho \left( \frac{1}{E_b} + \frac{1}{E} k_d^2 \frac{d_{ar}}{2\delta_{ar}} \right)}};$$

– числа неблокированных сфинктеров от уровня стрессовой нагрузки, коэффициентов  $c_x^x$  линейной зависимости:

$$k_{sf}^a = \left( 1 - c_s^0 \frac{k_{str} - 1}{c_s^1} \right);$$

– диаметра артерий и артериол (сфинктеров) от коэффициента деформации сосудов:

$$d_{ar} = k_d \cdot d_{ar}^0, \quad d_{art} = \frac{d_{art}^0}{k_d};$$

– дилатации сосудов от давления, плотности крови и скорости пульсовой волны:

$$k_{dt} = \sqrt{1 + 1330 \frac{P_{\min}}{\rho \cdot C_v^2}};$$

– доли сердечного цикла, в течение которого происходит движение крови, от коэффициента интегральной тоничности, определяемого по линейной зависимости от исходных давлений:

$$k_{tcc} = \left( 1 - 2 \left( 1 - x_t^0 + \frac{x_t^1}{40} (P_{\max}^0 - P_{\min}^0) \right) \right);$$

– давлений в сфинктерах, артериолах и артериях двух уровней по формуле Лейбенсона для ламинарного потока от плотности, минутного объема и вязкости крови, коэффициентов деформации и дилатации, числа, длины и исходного диаметра сосудов:

$$P_3 = P_{cap} + 1000 \cdot \frac{\rho}{13,595} \cdot 4,15 \cdot 0,95 \frac{\frac{V_m}{n_{sf} \cdot k_{sf}^a \cdot 60 \cdot 1000 k_{tcc}} \cdot \frac{\eta}{10^6}}{\left( \frac{d_{sf}}{1000 k_d} \right)^4} \cdot \frac{l_{sf}}{1000};$$

$$P_{\min} = P_3 + 1000 \cdot \frac{\rho}{13,595} \cdot 4,15 \cdot 0,95 \frac{\frac{V_m}{n_{art} \cdot 60 \cdot 1000 k_{tcc}} \cdot \frac{\eta}{10^6}}{\left( \frac{d_{art}}{1000 k_d} \right)^4} \cdot \frac{l_{art}}{1000};$$

$$P_3 = P_{\min} + 1000 \cdot \frac{\rho}{13,595} \cdot 4,15 \cdot 0,95 \frac{\frac{V_m}{n_{ar2} \cdot 60 \cdot 1000 k_{tcc}} \cdot \frac{\eta}{10^6}}{\left( \frac{d_{ar2} \cdot k_d \cdot k_{dt}}{1000} \right)^4} \cdot \frac{l_{ar2}}{1000};$$

$$P_{\max} = P_3 + 1000 \cdot \frac{\rho}{13,595} \cdot 4,15 \cdot 0,95 \frac{\frac{V_m}{n_{ar} \cdot 60 \cdot 1000 k_{tcc}} \cdot \frac{\eta}{10^6}}{\left( \frac{d_{ar} \cdot k_d \cdot k_{dt}}{1000} \right)^4} \cdot \frac{l_{ar}}{1000}.$$

Скриншот результатов анализа (бланк диагностики) программы БИОДИС показан на рис. 1.

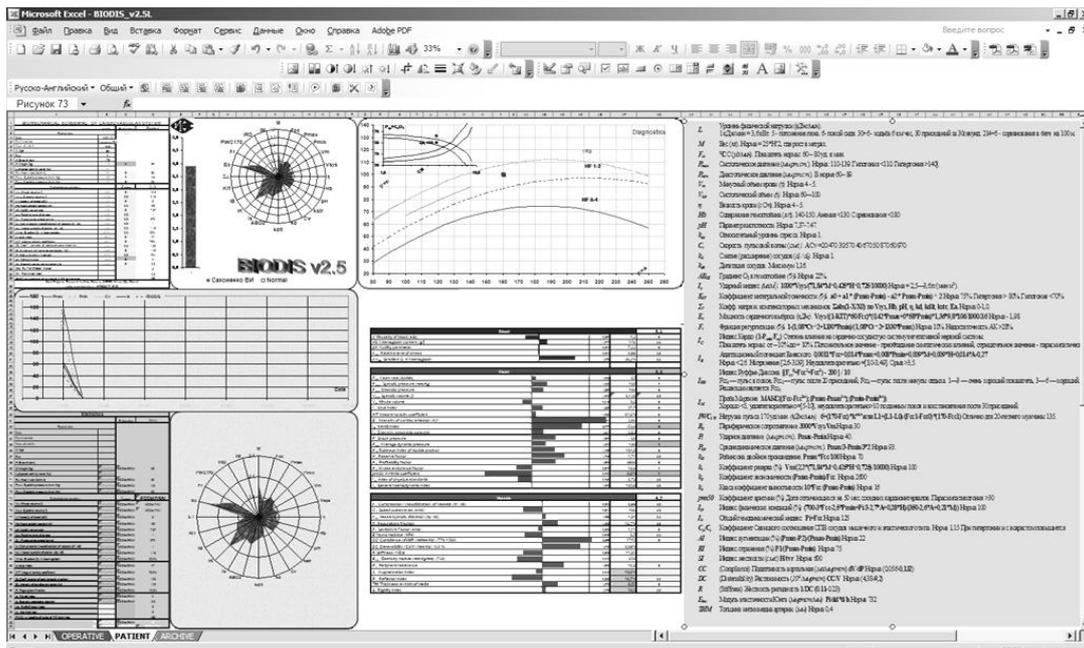


Рис. 1. Бланк диагностики программы БИОДИС

Общее число выходных параметров, включая обобщенные показатели гемодинамики, – 40, графических форм – 6. Параметры гемодинамики оцениваются по десятибалльной шкале с вычислением интегральной оценки по пятибалльной шкале. Программная реализация в EXCEL содержит листы оперативного управления, расчетных результатов и архива с результатами 4000 анализов. Программа применялась при обследовании пациентов Гомельского кардиологического диспансера; населения в условиях стандартного поликлинического обследования; спортивных команд и студенческих групп в состоянии покоя и в режиме стандартного нагрузочного теста, состоящего из трех замеров: в положении покоя, непосредственно после 30 приседаний в течение 30 с и после 3 мин отдыха.

В качестве примера в табл. 3 даны результаты расчета параметров гемодинамики обследуемого со следующими антропометрическими данными: мужчина в возрасте 20 лет, рост 170 см, масса тела 70 кг и тонометрическими показателями: ЧСС – 70, артериальное давление 120/80, приведены также весовые коэффициенты, используемые в процедуре минимизации невязок.

Данные результаты получены для двух вариантов, отличающихся по числу разбиения допустимых интервалов изменения искомых данных  $N_s$ . Здесь же указаны продолжительность одного расчета  $t_c$  и число найденных промежуточных решений  $N_d$ , характеризующие эффективность алгоритма при использовании процессора с частотой 1,9 ГГц.

Таблица 3

Результаты расчета параметров гемодинамики и оценка эффективности алгоритма численного решения

$N_s$	$t_c$	$N_d$	$V_{sys}$	$pH$	$Hb$	$\eta$	$k_{str}$	$E$	$C_v$	$k_d$	$k_{dlt}$	$ABO_2$	$O_2$
Субъект «норма» в покое													
7	7	68	0,088	7,34	149	6,2	1,00	5,4	487	1,029	1,189	28,3 %	296
			Отклонение от нормы, %										
			109,8	99,6	99,4	127	100	44,5	81,2	102,9	102,6	118	-
Субъект «норма» в покое													
9	19	113	0,084	7,34	150	5,9	1,00	9,2	616	1,057	1,122	29,4 %	296
			Отклонение от нормы, %										
			105,3	99,5	99,7	119	100	74,9	102,7	105,7	96,6	122	
Весовые коэффициенты													
			$m_{sys}$	$m_{pH}$	$m_{Hb}$	$m_{\eta}$	$m_{str}$	$m_E$	–	$m_d$	–	–	–
			1	66	1	1	5	1	–	1	–	–	–

Примечание: параметры с отсутствующими весами отклонений не используются в процедуре минимизации невязок.

Полученные расчетные значения гемодинамических показателей (систолического объема, параметра кислотного равновесия, содержания гемоглобина, вязкости крови, коэффициентов стрессовой нагрузки и исходной деформации артериальных сосудов, модуля упругости стенок сосудов, скорости пульсовой волны, артеровенозного градиента по кислороду) сравниваются с их нормами; приведены также использованные весовые коэффициенты процедуры минимизации невязок. Временные параметры включают шаг сетки разбиения допустимых интервалов искомым данным  $N_s$ , продолжительность одного расчета  $t_c$ , количество найденных промежуточных решений  $N_d$ .

## 2. Программная реализация расширенной осциллометрии и анализ результатов диагностики

Обобщенный диагностический подход расширенной осциллометрии реализован в компьютерной программе БИОСПАС (результаты и процедура расчетов представлены на рис. 2 и 3 соответственно), которая в настоящее время проходит верификацию.

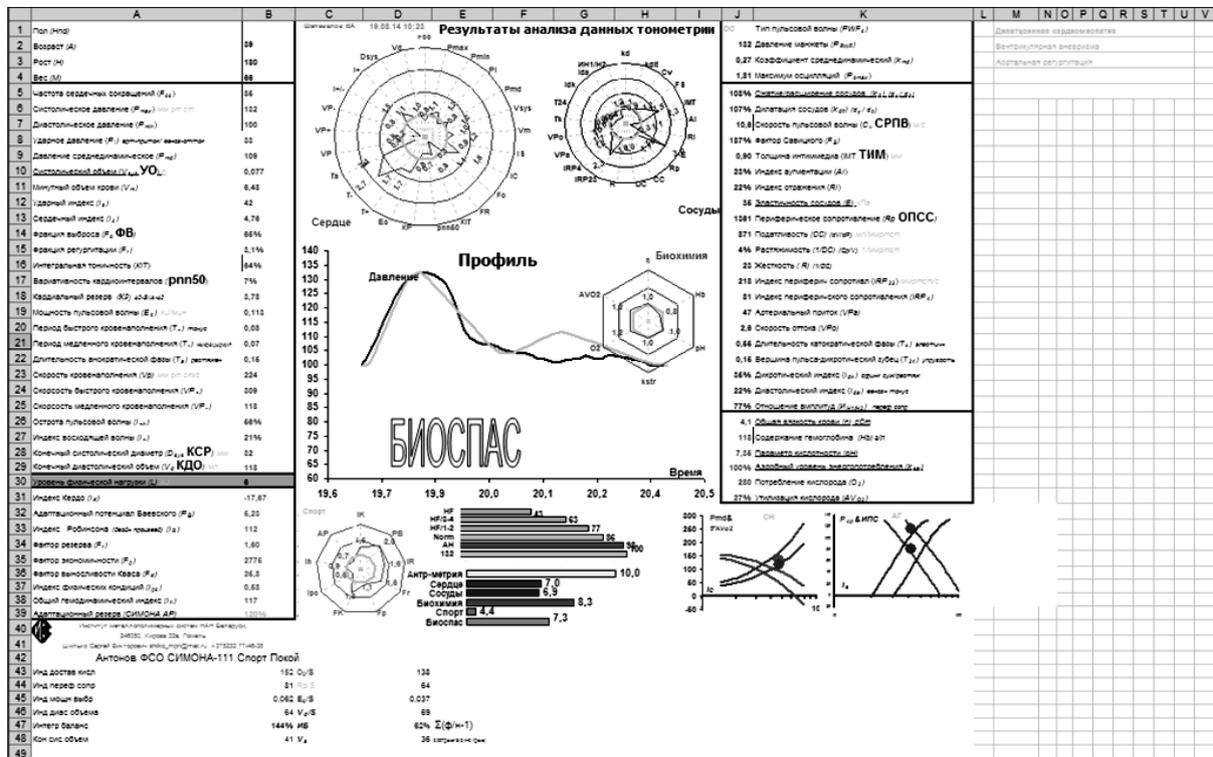


Рис. 2. Результаты диагностики с использованием комплекса БИОСПАС

При обработке данных используются:

- модуль СПАС [39], выполняющий прием и архивацию осциллометрических данных, получаемых от тонометра [40], построение пульсограммы и определение расчетных оценок скорости пульсовой волны, доли диастолической части кардиоинтервала и содержания гемоглобина;
- модифицированная компьютерная программа БИОДИС [41] для определения основных параметров гемодинамики за исключением указанных выше первичных параметров;
- модуль определения списка гемодинамических параметров, расширенного до 80 позиций.

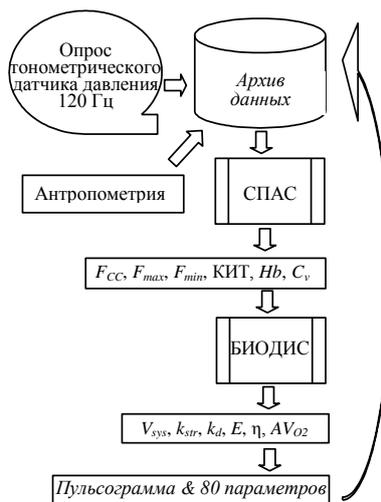


Рис. 3. Последовательность обработки данных компьютерной программой БИОСПАС

На основе данных осциллометрии, нагрузочного режима (теста) и антропометрических показателей (пол, рост, вес, возраст) обследуемого в программе БИОСПАС вычисляются параметры:

- сердечной деятельности: ЧСС; систолическое, диастолическое, ударное и среднединамическое давление; систолический и минутный объемы крови; ударный и сердечный индексы; фракции выброса и регургитации; коэффициенты интегральной тоничности и вариативности кардиоинтервалов; кардиальный резерв; мощность пульсовой волны; скорости и периоды быстрого и медленного кровенаполнения; длительность анократической фазы; острота пульсовой волны; индекс восходящей волны; конечные систолический диаметр и диастолический объем сердца;

- сосудистой сети: сжатие/расширение и дилатация сосудов, скорость пульсовой волны, фактор Савицкого, толщина интимедиа, индексы аугментации и отражения, эластичность и растяжимость сосудов, периферическое сопротивление, первый и второй индексы периферического сопротивления, артериальный приток, скорость оттока, длительность катократической фазы, длительность отрезка «вершина пульса – дикротический зубец», дикротический и диастолический индексы, отношение амплитуд давления в точках аугментации к максимальному давлению;

- биохимические: содержание гемоглобина, параметр кислотного равновесия и вязкость крови, уровень аэробного энергообеспечения, артеровенозный градиент по кислороду, объем потребления кислорода;

- функциональные: адаптационный потенциал Баевского, индекс Кердо соотношения симпатикотонии и парасимпатикотонии, коэффициент Робинсона (двойного произведения), экономичность и резерв кровообращения, общий гемодинамический индекс, сердечный индекс, коэффициенты выносливости Кваса, индексы физических кондиций и общединамический, адаптационный резерв.

Каждой группе параметров дается десятибалльная оценка отклонений от норм и рассчитывается десятибалльная интегральная оценка гемодинамики. Приводятся диаграммы отклонений параметров группы от норм и оценок групп параметров, давления в манжете с выделенными точками осцилляции, амплитуд и производных осцилляции, а также номограммы для выявления гипертензии и сердечной недостаточности, пульсограмма (график давления в манжете в течение одного периода сокращения сердца пациента) и контрольный профиль пульсограммы с известным состоянием ССС.

Процедура обработки данных включает следующие операции:

1. При чтении архивного столбца значений давления одного цикла тонометрии с фиксированным шагом по времени и сглаживания по заданному числу точек анализируется нисходящая ветвь кривой тонометрии. Создается массив точек излома кривой, на основании которого

строится массив параметров отдельных пульсограмм. Определение точек излома кривой тонометрии выполняется в два этапа, включая определение точек максимальной скорости изменения давления и определение минимумов давлений на интервалах между максимумами скорости изменения давлений. Точки максимального и среднединамического давления определяются стандартными способами по диаграммам амплитуд осциллометрических пиков и их производных. Возможно автоматическое определение числа точек сглаживания по минимуму отклонения максимального давления от среднединамического давления.

2. В цикле просмотра массива параметров пульсограмм в интервале  $[0,9 \dots 1,1 P_{max}]$  выделяется область пульсограммы, для которой вычисляются давление аугментации и отражения, время отражения, индексы аугментации и отражения, скорость пульсовой волны, коэффициент интегральной тоничности, коэффициент аритмии, толщина интимедиа артерии, содержание гемоглобина, вязкость крови, систолический объем. По модифицированному алгоритму программы БИОДИС на основании антропометрических показателей, артериального давления, содержания гемоглобина и скорости пульсовой волны вычисляются: параметр кислотного равновесия, вязкость крови, артеровенозный градиент по кислороду, доля аэробного способа энергообеспечения, коэффициент сжатия/расширения артерий, модуль Юнга материала стенок артерий. Производится осреднение значений входных и расчетных параметров. Модификация алгоритма программы БИОДИС, используемая в качестве модуля программы БИОСПАС, состоит в следующем:

– уменьшена степень вложенности циклов перебора значений искомым параметров с пяти до трех за счет исключения вариативности содержания гемоглобина и модуля упругости материала стенок артериальных сосудов, вычисляемого исходя из заданной скорости пульсовой волны и варьируемого значения коэффициента деформации сосудов;

– скорректированы весовые коэффициенты невязок с учетом изменения числа искомым параметров.

Пульсограмма пациента (рис. 2 и 4) сравнивается с массивом из 24 контрольных пульсограмм (лист Album), взятых из литературных источников с определением минимума интеграла отклонений. Далее вычисляются остальные параметры программы БИОСПАС из вышеприведенного списка. Указываются имена и коды имен пульсограмм, графики, контрольные точки изгибов пульсограмм и тонометрические параметры (ЧСС, максимальное и минимальное артериальное давление).

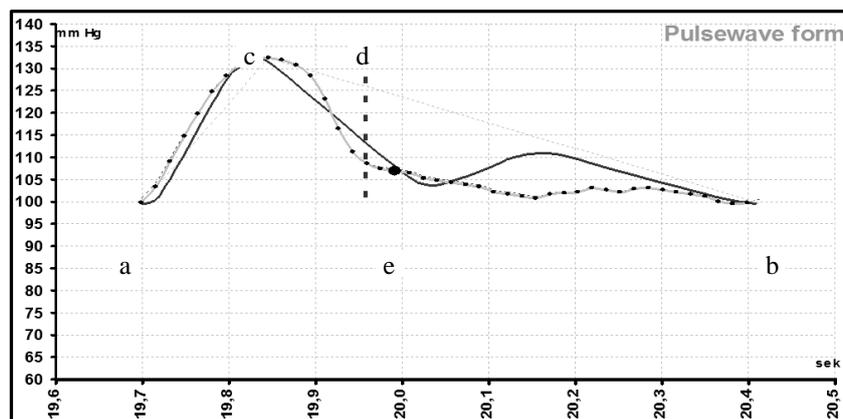


Рис. 4. Сопоставление пульсограммы пациента и контрольной пульсограммы

С учетом приведенных на рис. 4 временных координат контрольных точек конкретизируются зависимости для расчета диастолической доли кардиоинтервала  $KИТ = (t_b - t_c) / (t_b - t_a)$  и скорости пульсовой волны  $C_v = H / (t_e - t_c)$ . Содержание гемоглобина определяется по статистической зависимости [42]

$$Hb = 17,67 \left( F_{cc} \cdot (P_{max} - P_{min})^{-0,41} \cdot \left( \frac{C_v}{10} \right)^{-0,2} \right) / (KИТ \cdot P_{max} \cdot P_{min}).$$

Архив данных, созданный к настоящему времени при апробации программы БИОСПАС, содержит 200 позиций, в том числе по результатам длительного наблюдения пациента с гипертоническим диагнозом в покое и диагностики студентов со спортивной квалификацией и без нее в условиях нагрузочного теста. Результаты статистической обработки данных представлены на рис. 5 и в табл. 4. Выявлены следующие особенности гемодинамики:

1. Пульсограмма пациента с гипертоническим диагнозом близка к различным контрольным формам пульсовой волны, полученным в разное время, подтверждая атеросклеротическую патологию сосудов.

2. Обследование большинства студентов в покое показало форму пульсовой волны, характерную для юношеской нормотонии, однако диагностика гемодинамики после тестовой нагрузки и восстановления выявила у части обследуемых студентов патологические формы пульсовой волны. Наибольшей вариативностью при тестировании отличались параметры мощности и объема сердечного выброса. Спортивная квалификация обследуемых подтверждалась меньшими значениями параметра вариативности длительности кардиоинтервалов.

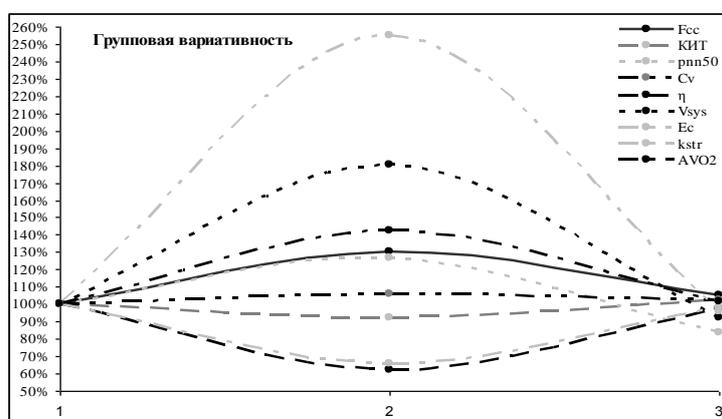


Рис. 5. Групповая вариативность параметров при проведении нагрузочного теста «покой – приседания – восстановление»

Таблица 4

Результаты диагностики группы студентов

Параметр	Значение		
	В покое	После нагрузки	После восстановления
$F_{cc}$	64	83	67
$P_{max}$	122	141	123
$P_{min}$	73	80	71
КИТ, %	73	67	74
pnn50, %	33	42	28
$C_v$	7,9	8,4	8,1
$\eta$	4,0	2,5	3,9
Hb	135	133	133
$V_{sys}$	0,075	0,136	0,069
TIM	0,65	0,70	0,68
$E_c$	0,067	0,171	0,065
$k_{d,}$ %	100	100	100
E	15	18	16
$R_p$	48	38	45
pH	7,29	7,20	7,29
$k_{str,}$ %	99	65	97
AVO <sub>2</sub> , %	37	52	37
$F_{O_2}$ %	71	77	69
$D_{sys}$	29	32	28

Программы БИОСПАС и БИОДИС применялись в условиях нагрузочного тестирования профессиональных спортсменов (футболистов и хоккеистов, членов сборных Республики Беларусь по самбо (рис. 6) и пожарно-техническим видам спорта [43], членов женской сборной Гомельской области по боксу, студентов физкультурного факультета Гомельского университета им. Ф. Скорины различной специализации и квалификации; студентов военного факультета Белорусского университета транспорта, прошедших медицинскую комиссию, а также студентов Гомельского медицинского университета.

		$L$	$F_{cc}$	$P_{max}$	$P_{min}$	$V_{sys}$	$pH$	$\eta$	$k_{str}$	$C_v$	$KT$	$ABO_2$	$IC$	$IB$
Самбо	20.10.10	8	72	133	80	0,119	7,35	7,0	1,04	515	82%	26,7%	-13,8	4,8
		47	93	155	89	0,171	7,06	4,7	0,83	591	87%	66,9%	3,2	5,2
ЧМ		8	87	123	76	0,116	7,30	4,4	1,00	628	78%	35,1%	12,7	4,7
		8	54	147	80	0,279	7,40	7,0	1,15	496	89%	20,0%	-48,1	5,4
		61	84	161	93	0,299	6,99	4,4	0,92	596	89%	72,7%	-10,7	5,7
		9	78	134	72	0,131	7,33	7,6	1,05	681	87%	30,3%	7,7	5,1

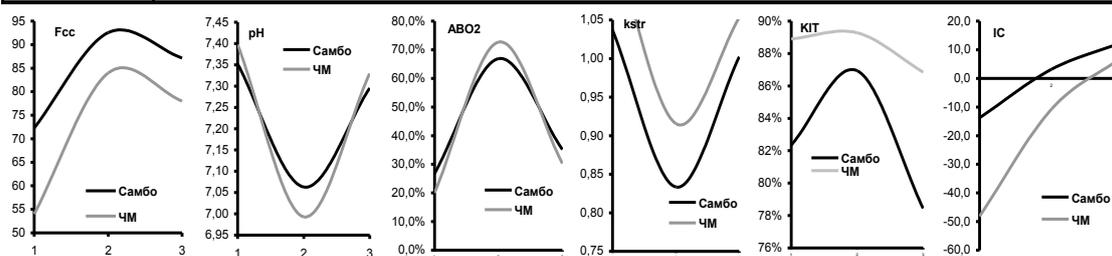


Рис. 6. Опыт использования программы БИОДИС в сборной Республики Беларусь по самбо накануне Чемпионата мира 2010 г. (особенности гемодинамики чемпиона: сниженная  $F_{cc}$ , более резкие изменения  $pH$  и  $ABO_2$ , высокий  $k_{str}$ , более плавные изменения диастолической доли кардиоинтервала и индекса Кердо)

Статистическая обработка результатов позволяет выделить параметры, подверженные значительным изменениям в ходе тренировок с учетом специализации, квалификации и гендерных различий. Однако следует подчеркнуть, что список наиболее информативных параметров варьируется для различных обследуемых групп и целей обследования.

Результирующие параметры гемодинамики при проведении нагрузочного теста (30 приседаний за 30 с) позволяют оценить следующие показатели:

- соотношение аэробного и анаэробного энергообеспечения как показатель адаптационных резервов организма спортсмена (ключевым параметром является уровень стрессовой нагрузки, разница минимума которого для конкретного спортсмена и абсолютного группового минимума является показателем анаэробного резерва);

- резервы аэробного энергообеспечения, исходя из ЧСС, объема систолического выброса и артериального градиента по кислороду, определяемого параметром кислотно-щелочного равновесия крови. Выявленные минимумы  $pH$  лучших спортсменов, как правило, находятся в запредельной (фактически летальной) зоне для обычного человека;

- индексы Кердо и  $p_{m50}$  позволяют оценить степень нагрузки на центральную нервную систему и, следовательно, ее резервные возможности для координации действий спортсмена.

Представляется возможной оценка нагрузочных изменений длительности диастолической фазы кардиоинтервала и реакции сосудистой части системы кровообращения. Для выявления патологии «спортивное сердце» и других кардиомиопатий крайне важен скрининг систолического объема и геометрических параметров сердца.

## Заключение

Использование биомеханического анализа ССС на основе данных осциллометрии и достаточно простой одномерной модели гемодинамики дополняет обычно применяемые в медицинской практике инструментальные методы скрининга донозологических состояний, позволяя быстро и без значительных материальных затрат получить расширенный объем информации для выявления кардиопатологий и оценки адаптивных возможностей ССС. Разработанный авторами диагностический подход при реализации алгоритмов и программ в виде андроидных приложений может стать основой для создания отечественного тонометра с расширенными

функциями, инновационным и массовым средством поликлинического скрининга и самоконтроля ССС широких слоев населения. Применение разработанных программ и стандартного нагрузочного тестирования в ходе спортивных тренировок дает достоверную оценку физиологического состояния спортсменов различной специализации высшей и массовых квалификаций.

Работа выполнена в рамках задания 3.5.04 «Создание программно-аппаратных средств биомеханической диагностики и интеллектуальных тренажеров для оптимизации тренировочной и соревновательной деятельности спортсменов» ГПНИ «Конвергенция».

### Список литературы

1. Мрочек, А.Г. Сердечно-сосудистые заболевания в Республике Беларусь. Анализ ситуации и система контроля / А.Г. Мрочек. – Минск : Белорусская наука, 2011. – 341 с.
2. Инструментальные методы исследования в кардиологии : руководство / под ред. Г.И. Сидоренко ; БелНИИ кардиологии Минздрава РБ. – Минск, 1994. – 272 с.
3. Зубчук, В.И. Оценка адаптивных возможностей человека по реакции на динамическую нагрузку / В.И. Зубчук, Е.А. Настенко, Е.К. Носовец // Электроника и связь. – 2009. – № 4. – С. 242–244.
4. Баевский, Р.М. Оценка адаптационных возможностей организма и риск развития заболеваний / Р.М. Баевский. – М. : Медицина, 1997. – 265 с.
5. Михаил, И.И. Моделирование процесса физической подготовки военнослужащих / И.И. Михаил, В.Д. Гетьман, Ю.С. Харламов // Уч. записки ун-та им. Лесгафта. – 2007. – № 4. – С. 47–49.
6. Карпман, В.Л. Динамика кровообращения у спортсменов / В.Л. Карпман. – М. : Физкультура и спорт, 1982. – 135 с.
7. Питкевич, Ю.Э. Вариабельность сердечного ритма у спортсменов / Ю.Э. Питкевич // Проблемы здоровья и экологии. – 2010. – № 4. – С. 101–106.
8. Савицкий, Н.Н. Биофизические основы кровообращения и клинические методы изучения гемодинамики / Н.Н. Савицкий. – Л. : Медицина, 1963. – 403 с.
9. Физиология человека / под ред. В.М. Покровского. – М. : Медицина, 2007. – 656 с.
10. Парашин, В.Б. Биомеханика кровообращения / В.Б. Парашин. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 224 с.
11. Лищук, В.А. Математическая теория кровообращения / В.А. Лищук. – М. : Медицина, 1991. – 256 с.
12. Шилько, С.В. Модель авторегуляции кровообращения при активном деформационном поведении сосудов / С.В. Шилько // Российский журнал биомеханики. – 2000. – Т. 4, № 1. – С. 43–48.
13. Астраханцев, Е.В. Математическое моделирование гемодинамики крупных кровеносных сосудов / Е.В. Астраханцев // Математическое моделирование. – 2005. – Т. 17, № 8. – С. 61–80.
14. Медведев, А.Е. Двухфазная модель течения крови в крупных и мелких кровеносных сосудах / А.Е. Медведев // Математическая биология и биоинформатика. – 2011. – Т. 6, № 2. – С. 228–249.
15. Евдокимов, Е.И. Взаимосвязь потребления кислорода и динамики биохимических показателей крови спортсменов под влиянием физической нагрузки / Е.И. Евдокимов // Физ. восп. студентов. – 2011. – № 3. – С. 42–45.
16. Лазерный анализ эндогенного СО в выдыхаемом воздухе / Ю.А. Шулагин [и др.] // Тр. Ин-та общей физики им. А.М. Прохорова. – 2005. – Т. 61. – С. 135–189.
17. Бессонов, А.Е. Способ миллиметрово-волновой терапии / А.Е. Бессонов, М.В. Балакирев // Вестник новых медицинских технологий. – 1998. – Т. 5, № 2. – С. 105–108.
18. Величко, А.Д. Программно-аппаратный комплекс для функциональной диагностики сердечно-сосудистой системы / А.Д. Величко, А.М. Сударев, И.Л. Кадин // Материалы Третьей науч.-практ. конф. «Неинвазивный мониторинг состояния сердечно-сосудистой системы в клинической практике». – М., 2001. – С. 160–163.

19. Инструкция по применению аппаратно-программного комплекса неинвазивного исследования центральной гемодинамики методом объемной компрессионной осциллометрии КАП ЦГосм-«Глобус» [Электронный ресурс]. – 2004. – 74 с. – Режим доступа : [http://www.ecolmed.ru/downloads/metod\\_recom\\_apko\\_2006.pdf](http://www.ecolmed.ru/downloads/metod_recom_apko_2006.pdf). – Дата доступа : 06.11.2014.
20. Основные характеристики аппаратно-программного комплекса «Истоки здоровья» MyBody 4.1 [Электронный ресурс]. – Рязань, 2004. – 4 с. – Режим доступа : <http://www.breath.ru>. – Дата доступа : 06.11.2014.
21. Цупко, И.В. Определение основных гемодинамических показателей с расчетом риска сердечно-сосудистых заболеваний. Методические указания по применению ЭДТВ / И.В. Цупко [Электронный ресурс]. – М., 2008. – 10 с. – Режим доступа : <http://medtehnoplus.ru/files/gemodin-metod.doc>. – Дата доступа : 06.11.2014.
22. Методические рекомендации к осциллометрическому анализатору параметров сердечного выброса и артериального давления АПКО-8-РИЦ. Восточноевр. центр инновац. технологий [Электронный ресурс]. – 2006. – 35 с. – Режим доступа : [http://www.ecolmed.ru/product\\_3.html](http://www.ecolmed.ru/product_3.html). – Дата доступа : 06.11.2014.
23. Operator's Manual SphygmoCor CvMS – Central Blood Pressure / Pulse Wave Velocity / Heart Rate Variability [Электронный ресурс]. – 2008. – 63 р. – Режим доступа : <http://www.atcormedical.com>. – Дата доступа : 06.11.2014.
24. Варианты поставки системы интегрального мониторинга «СИМОНА-111». – 2008. – 11 с. – Режим доступа : <http://www.symona.ru>. – Дата доступа : 06.11.2014.
25. Парфенов, А.С. Ранняя диагностика сердечно-сосудистых заболеваний с использованием аппаратно-программного комплекса «Анализатор Малыгина – Пулавского (АМП)» / А.С. Парфенов [Электронный ресурс]. – 2009. – 42 с. – Режим доступа : [http://www.amp.life3000.ru/images/user\\_manual\\_amp2009.pdf](http://www.amp.life3000.ru/images/user_manual_amp2009.pdf). – Дата доступа : 06.11.2014.
26. Комплекс «Ангиоскан-01» // Поликлиника. – 2008. – № 2 (1). – С. 8–12.
27. Фролов, А.В. Контроль механизмов адаптации сердечной деятельности в клинике и спорте / А.В. Фролов. – Минск, 2011. – 216 с.
28. Siggaard-Andersen, O. Oxygen and Acid-Base Parameters of Arterial and Mixed Venous Blood, Relevant Versus Redundant / O. Siggaard-Andersen, I.H. Gothgen // *Acta Anaesthesiol Scand.* – 1995. – Vol. 39, no. 107. – P. 21–27.
29. Sears, D.W. Instructional Biochemistry Web Site. Hemoglobin Saturation Analysis. Univ. of California, Santa Barbara / D.W. Sears [Electronic resource]. – 2010. Mode of access : <http://www.mcdb-webarchive.mcdb.ucsb.edu/sears/biochemistry/tabs-contents-frames.htm>. – Date of access : 06.11.2014.
30. Hever, T. Are There Arterio-Venous Differences of Blood Micro-Rheological Variables in Laboratory Rats? / T. Hever, F. Kiss, E. Sajtos // *Korea-Australia Rheology J.* – 2010. – Vol. 22, no. 1. – P. 59–64.
31. Shaukat, A. Correlation Between Pre- and Post Exercise Blood Lactate and pH / A. Shaukat, B. Azizullah, K. Habib-ullah // *Gomal J. of Medical Sciences.* – 2008. – Vol. 6, no. 1. – P. 1–2.
32. Goodwin, M.L. Blood Lactate Measurements and Analysis during Exercise: A Guide for Clinicians / M.L. Goodwin, J.E. Harris, A. Hernandez // *J. of Diabetes Sc. and Techn.* – 2007. – Vol. 1, no. 4. – P. 558–569.
33. Campbell, J. A Concerning the Influence of Atmospheric Conditions upon the Pulse Rate and «Oxygen Debt» after Running / J. Campbell // *Proc. R. Soc.* – 2011. – Vol. 96. – P. 43–59.
34. Dimkpa, U. Assessment of Sex Differences in Systolic Blood Pressure Responses to Exercise in Healthy, Non-Athletic Young Adults / U. Dimkpa, A. Ugwu, D. Oshi // *J. of Exercise Phys.* – 2008. – Vol. 11, no. 2. – P. 18–25.
35. Gallagher, A.J. Blood Gas, Oxygen Saturation, pH, and Lactate Values in Elasmobranch Blood Measured with a Commercially Available Portable Clinical Analyzer and Standard Laboratory Instruments / A.J. Gallagher // *J. of Aquatic Animal Health.* – 2010. – Vol. 22. – P. 229–234.
36. Шилько, С.В. Моделирование гидродинамического трения: аналогия системы кровотока и трубопроводного транспорта нефти / С.В. Шилько, Ю.Г. Кузьминский // *Совре-*

менные информационные и телемедицинские технологии для здравоохранения (АІТТН'2008) : материалы II Междунар. науч. конф. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2008. – С. 338–343.

37. Кузьминский, Ю.Г. Методика и компьютерная система диагностики состояния сердечно-сосудистой системы / Ю.Г. Кузьминский [и др.] // Проблемы здоровья и экологии. – 2009. – № 2. – С. 90–96.

38. Шилько, С.В. Математическая модель и программная реализация мониторинга сердечно-сосудистой системы / С.В. Шилько, Ю.Г. Кузьминский, М.В. Борисенко // Проблемы физики, математики и техники. – 2011. – № 3. – С. 104–112.

39. Свид. № 456 от 21.11.2012 о регистрации компьютерной программы СПАС V1.0 / С.В. Шилько, Ю.Г. Кузьминский ; заявка С20120072 от 27.09.2012 // Реестр зарег. комп. программ / Нац. центр інтэл. уласнасці. – 2012. – 11 с.

40. Аппаратная реализация биомеханической диагностики сердечно-сосудистой системы по данным осциллометрии / В.В. Шевцов [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2012. – № 2 (5). – С. 51–55.

41. Свид. № 455 от 21.11.2012 о регистрации программного продукта БИОДИС V2.5 / Ю.Г. Кузьминский, С.В. Шилько ; заявка С201210073 от 27.09.2012 // Реестр зарег. комп. программ / Нац. центр інтэл. уласнасці. – 2012. – 25 с.

42. Исследование роли отдельных реологических характеристик крови в изменении ее текучести и транспортного потенциала / А.В. Муравьев [и др.] // Российский журнал биомеханики. – 2012. – Т. 16, № 3 (57). – С. 32–41.

43. Применение биомеханической диагностики в подготовке спортсменов-спасателей / Ю.Г. Кузьминский [и др.] // Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации : материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Гомель, 2014. – С. 347–349.

Поступила 05.09.2014

*Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси,  
Гомель, Кирова, 32а  
e-mail: Shilko\_mpri@mail.ru*

**Yu.G. Kuzminsky, S.V. Shilko**

#### **METHOD OF CARDIOVASCULAR SYSTEM ON THE BASIS OF ONE DIMENSION HAEMODYNAMICS MODEL**

A method of screening a cardiovascular system state using original software, which realizes mathematical analysis of oscillometry data in terms of biomechanical model of hemodynamics, is described. The screening, based on the proposed method, allows to expand the possibilities of classical oscillometry and to obtain the important information about the state of heart and blood vessels as well as the adaptability of humans (particularly, athletes) under various physiological loads.

УДК 004.89:004.4; 681.513.7

Г.А. Прокопович

## МОДЕЛИРОВАНИЕ АДАПТИВНОГО ПОВЕДЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ ДВИЖЕНИЯ АВТОНОМНОГО МОБИЛЬНОГО РОБОТА ПО ПЛОСКОСТИ С ПРЕПЯТСТВИЯМИ

*Предлагается адаптивный нейроконтроллер для управления автономным мобильным роботом, который предназначен не только для генерации управляющих сигналов (согласно заранее заданному алгоритму движения), но и для выработки в процессе функционирования робота индивидуальных реакций на некоторые внешние стимулы, что позволит ему адаптироваться к изменениям внешней среды. Для отладки и тестирования предложенного нейроконтроллера используется разработанная программа имитационного моделирования, способная воспроизвести работу сенсорной и исполнительной систем мобильного робота.*

### Введение

В современной робототехнике большое значение имеет решение задач интеллектуального анализа и интеграции сенсорных данных, снимаемых с различных датчиков, с последующим построением системы целостного восприятия информации и формированием знаний о внешней среде и значениях внутренней структуры робота [1]. Актуальность решения указанных задач значительно возрастает по мере увеличения времени и уровня автономной работы, а также наделения роботов большей степенью мобильности. Информационные системы автономных мобильных роботов (АМР) должны удовлетворять следующим требованиям:

- обеспечение автоматического движения;
- обеспечение безопасности;
- определение положения мобильного робота в пространстве;
- составление описания рабочей зоны.

Для удовлетворения этих требований АМР оснащаются различными современными сенсорами: одометрическими датчиками, инерциальными системами позиционирования, видекамерами, сонарами и сканирующими дальномерами (лидарами), а также системами спутниковой навигации.

Согласно классификации по максимальному радиусу действия сенсорные системы АМР делятся на системы ближнего и дальнего действия [2]. Сенсорные системы первого типа предназначены для обеспечения безопасной работы АМР, а также для построения плана обхода и преодоления близлежащих препятствий. Сенсорные системы второго типа предназначены для пространственного ориентирования и построения маршрута движения на местности в пределах рабочей зоны АМР.

Несмотря на обилие и широкое разнообразие современных сенсорных датчиков, а также наличие высокопроизводительных цифровых вычислительных устройств, процесс разработки сенсорных систем для решения задач навигации и управления АМР является весьма сложной и не до конца решенной задачей. Это связано, во-первых, с трудностями подбора типов, а также числа и места расположения датчиков. Во-вторых, более сложной задачей является анализ сенсорных данных. Если этапы предварительной обработки (фильтрации и сегментации) уже достаточно хорошо изучены, то процесс распознавания образов, включающий их структурный анализ и интерпретацию, представляет собой нетривиальную задачу [1–3].

Таким образом, разработка систем адаптивного управления сложными техническими объектами, действующими в условиях неопределенности внешних возмущений и среды функционирования, требует привлечения нетрадиционных подходов с использованием новейших методов представления знаний, новых типов обратных связей, современных интеллектуальных, информационных и телекоммуникационных технологий, объединяемых общим названием «искусственный интеллект» [1]. В связи с этим использование АМР требует наличия интеллектуальной системы управления, которая способна самостоятельно принимать решения о дальней-

ших действиях, необходимых для выполнения поставленных оператором задач, и осуществлять полное управление исполнительными системами.

### 1. Искусственные нейронные сети как элементы интеллектуальных систем управления

Одно из лидирующих направлений в области искусственного интеллекта связано с моделированием искусственных нейронных сетей (ИНС), способных решать широкий круг задач распознавания образов, идентификации, прогнозирования, оптимизации и управления сложными объектами [1–3]. ИНС строятся по принципу организации и функционирования их биологических аналогов.

Преимущества ИНС перед традиционными методами искусственного интеллекта (продукционными системами, таблицами принятия решений, генетическими алгоритмами, нечеткой логикой и т. д.) проявляются при решении таких задач, в которых трудно выделить правила функционирования систем, обладающих большим числом степеней свободы, зато существует возможность обучения на множестве примеров [3, 4].

ИНС также успешно применяются для синтеза систем управления динамическими объектами [3, 5]. Они обладают рядом уникальных свойств, которые делают их мощным инструментом для создания систем управления: способностью к обучению на примерах и обобщению данных, способностью адаптироваться к изменению свойств объекта управления и внешней среды, пригодностью для синтеза нелинейных регуляторов, высокой устойчивостью к повреждениям своих элементов (в силу изначально заложенного в ИНС параллелизма) [1–5].

Таким образом, ИНС удобно применять в тех приложениях, где отсутствует возможность получения экспертных обучающих выборок. В этом случае наблюдается процесс самоорганизации, при котором ИНС без специального вмешательства извне изменяет свою функциональную структуру (рис. 1). Поскольку процесс самоорганизации проявляется в том, что ИНС самостоятельно отбирает из входного потока данных образцы для обучения, выбор модели ИНС должен учитывать специфику поступающей информации, средств измерения и управления.



Рис. 1. Процесс адаптации робота к условиям внешней среды через самоорганизацию структур управляющих ИНС

Тем не менее ИНС имеют и свои ограничения, связанные с отсутствием универсальной архитектуры и единых подходов для использования в системах управления, а также проблемами дообучения новой информации. В настоящее время в разработанных системах управления ИНС используются в виде отдельных блоков и в основном только для реализации функций классификации или интерполяции данных, что значительно сужает их потенциал.

При решении таких специальных задач, как реализация алгоритмов управления АМР, ИНС часто подвергаются критике [1, 3]. Во-первых, это связано с тем, что ИНС не являются системами управления в полном смысле слова, а лишь имитируют систему распознавания. Другими словами, функция входа-выхода ищется от одних переменных, а значения целевой функции системы задаются на других. Во-вторых, большинство классических алгоритмов обучения типа обратного распространения ошибки работают только в супервизорном режиме, т. е. несамообучаемы [2]. И, наконец, в-третьих, подобные ИНС не работают в условиях дообучения,

когда в процессе добавления к обученной сети нового образа уничтожаются или изменяются результаты предшествующего обучения.

Для преодоления перечисленных проблем автором была разработана нейросетевая модель итерационной гетероассоциативной памяти [6]. Указанная модель памяти была получена благодаря модификации архитектуры ИНС типа двунаправленной ассоциативной памяти (ДАП) посредством введения дополнительной обратной связи с временной задержкой и нового способа предварительной обработки входных данных, реализующей алгоритм секционирования исходных векторов. В зависимости от того, какого рода данные будут содержаться в соответствующих информационных блоках, на основе предложенной модели гетероассоциативной памяти имеется возможность разрабатывать различные информационные устройства. При этом для реализации классификаторов или устройств с контекстно-адресуемой памятью информационные блоки должны содержать только сенсорные данные, например графические образы [6]. На основе записи, хранения и извлечения только управляющих данных можно создавать системы управления техническими устройствами по жесткой программе [7], а для реализации программ с ветвящимися алгоритмами информационные блоки должны содержать как сенсорные, так и управляющие данные [8].

## **2. Реактивный контур нейросетевой интеллектуальной системы управления автономными мобильными роботами**

Для приспособления к постоянным условиям функционирования, при которых параметры среды изменяются в незначительных пределах, наиболее экономным средством адаптации как для естественных, так и для искусственных систем управления являются условные и безусловные рефлексы, позволяющие ограничиться весьма простым набором правил [4].

Таким образом, одним из самых простых, но не менее ответственных среди функциональных блоков систем управления АМР является реактивный контур управления, в котором реализуется анализ безусловных и условных рефлексов. Реактивный контур управления должен обладать способностью к обучению и запоминанию на определенное время определенных реакций исполнительской системы АМР при поступлении соответствующих стимулов. Для обеспечения перечисленных функциональных свойств его блок памяти должен выполнять следующие действия: восстанавливать из памяти и классифицировать входные образы на основе уже имеющихся эталонов, а также добавлять новые [9].

В статье [10] автором была предложена оригинальная нейросетевая модель иерархической интеллектуальной системы управления (ИСУ) АМР. ИСУ состоит из условных блоков процессора и памяти, которые сами включают распределенные подблоки, реализованные на основе гетероассоциативных ИНС. Как правило, на борту АМР находятся исполнительная и сенсорная системы, а также сама ИСУ, в контур управления которой входит блок оператора. Как правило, оператор должен взаимодействовать с ИСУ только до начала функционирования АМР (во время ввода целевых указаний и необходимых начальных данных) либо в критических ситуациях. ИСУ получает информацию от внешней и внутренней сред посредством блока рецепторов и воздействует на первую посредством исполнительской системы.

Безусловные и условные рефлексы, задействованные в первом контуре предложенной ИСУ, реализованы в блоке рефлексивного анализа в виде двух различных гетероассоциативных ИНС, которые при поступлении определенного стимула вызывают строго фиксированную реакцию. Благодаря наличию гетероассоциативных ИНС данный контроллер позволяет быстро извлекать из памяти эталонные образы и обрабатывать входную информацию, а также добавлять в память новые.

В настоящей работе предлагается реализация реактивного контура управления указанной ИСУ в виде адаптивного нейроконтроллера. Предложенный нейроконтроллер состоит из двух гетероассоциативных ИНС и предназначен не только для выполнения наперед заданной системы правил, но и для адаптации ИСУ к новым внешним условиям. Первая ИНС реализована в виде блока мотонейронов, в котором хранится алгоритм управления исполнительскими системами робота. Блок мотонейронов предназначен для ассоциации текущих входных параметров  $r_{\text{мото}}^{(N_2)}$  с определенным вектором-откликом  $u_i^{(M)}$ , соответствующим текущей  $i$ -й ситуа-

ции и принадлежащим множеству  $U_{\text{мото}} = \{u_1^{(M)}, u_2^{(M)}, \dots, u_k^{(M)}\}$  известных выходных управляющих параметров. Задачей второй ИНС, в качестве которой используется разработанный ранее классификатор АРТ-ДАП [11], является выполнение функции дообучения блока мотонейронов. Если ситуация окажется незнакомой либо данное действие противоречит критерию оптимальности, блок критерия оптимальности заблокирует выходные управляющие параметры блока мотонейронов. Под критерием оптимальности может пониматься, например, удержание в процессе движения АМР максимально безопасного расстояния до препятствий.

Таким образом, безусловные рефлексы (т. е. обучающие пары «стимул – реакция») должны записываться оператором в ИНС до начала функционирования АМР. Условные рефлексы, которые обеспечивают механизм индивидуального приспособления объекта управления к небольшим изменениям среды, должны запоминаться в процессе периодических внешних воздействий на объект управления с помощью процессов обучения ИНС мотонейронов. При этом если синаптические связи первой ИНС содержат информацию о критических значениях показателей, например, энергетической и транспортной систем и должны быть строго фиксированы, то синаптические связи второй ИНС должны обладать способностью к запоминанию результатов обучения только на конечное время (т. е. их можно будет переобучить). Если сигналы на выходе гетероассоциативной ИНС безусловных рефлексов являются пассивными (влияют только на управляющие сигналы блока принятия решений), то сигналы от ИНС условных рефлексов (мотонейроны) являются активными, т. е. непосредственно управляют исполнительной системой (например, движением АМР).

Согласно функциональной схеме (рис. 2) предложенный контур реактивного управления АМР работает следующим образом. В блок АРТ-ДАП, который отвечает за реализацию безусловных рефлексов, до начала функционирования АМР экспертом должны быть записаны ассоциативные пары «стимул – реакция», представляющие собой набор критических значений ответственных параметров мобильного робота и соответствующий им набор ответных действий исполнительной системы, которые предназначены для перехода системы обратно в нормальный режим. В блоке мотонейронов должны содержаться ассоциативные пары «стимул – реакция», однако в отличие от системы безусловных рефлексов в них хранится набор действий исполнительной системы, функционирующей в штатном режиме. Следует отметить, что длина  $N_2$  входного вектора  $r_{\text{мото}}^{(N_2)}$  для блока мотонейронов значительно превышает длину  $N_1$  входного вектора  $r_{\text{АРТ-ДАП}}^{(N_1)}$  для блока АРТ-ДАП. Это связано с различными типами используемых датчиков в каждом из описываемых блоков. Например, на вход блока АРТ-ДАП могут поступать цифровые сигналы от  $N_1$  датчиков препятствий (ближняя зона), а на вход блока мотонейронов –  $N_2$  значений сканирующего дальномера (рабочая область).

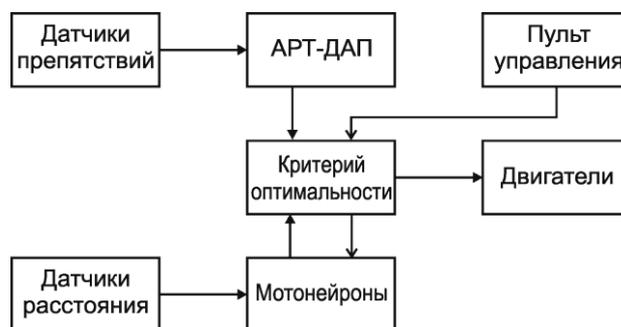


Рис. 2. Функциональная схема реактивного контура управления, состоящего из систем безусловных и условных рефлексов

Принцип работы блока критерия оптимальности заключается в следующем: если управляющие значения  $u_{\text{мото}}^{(M)}$ , полученные от блока мотонейронов, не противоречат управляющим значениям  $u_{\text{АРТ-ДАП}}^{(M)}$  блока безопасного движения АРТ-ДАП, блок критерия оптимальности соединит выходы блока мотонейронов с входами блока драйвера двигателей.

В противном случае блок критерия оптимальности принудительно создаст в долговременной памяти ИНС мотонейронов  $(k+1)$ -ю ассоциативную пару, выходной обучающий вектор  $T_{k+1}^{(M)}$  которой будет представлять собой управляющий вектор от блока АРТ-ДАП, а входной – обучающий вектор  $P_{k+1}^{(N_2+K)}$ , содержащий текущие данные от сканирующего дальномера и о состоянии объекта управления  $q$  итераций назад. В результате при повторении данной ситуации блок мотонейронов выдаст такие управляющие сигналы, которые не приведут к появлению внештатного режима работы АМР (в данном случае – столкновению с препятствием). Другими словами, обучающая выборка  $Tr_{\text{мото}} = \{P_i, T_i\}_{i=1,k}$  для ИНС мотонейронов предложенного адаптивного нейроконтроллера будет иметь следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{u}_{\text{мото}}^{(M)}[n] \neq \mathbf{u}_{\text{АРТ-ДАП}}^{(M)}[n]; \\ P_{k+1}^{(N_2+K)} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{\text{мото}}^{(N_2)}[n-q] \\ \text{-----} \\ \mathbf{s}^{(K)}[n-1-q] \end{bmatrix}; \\ T_{k+1}^{(M)} = \mathbf{u}_{\text{АРТ-ДАП}}^{(M)}[n]; \\ q = \frac{L}{V} \text{div } \Delta n, \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $N_2$  и  $M$  – длины сенсорного и управляющего векторов соответственно;  $k$  – число эталонов обучающей выборки;  $L$  – разница между радиусами действия сенсоров рабочей и ближней областей АМР, значения которых поступают на входы блоков мотонейронов и АРТ-ДАП соответственно;  $V$  – скорость движения АМР;  $\Delta n$  – шаг дискретного модельного времени  $n$ ;  $\mathbf{s}^{(K)}$  – вектор, описывающий состояния объекта управления. Как правило, для оценки текущего состояния объекта управления используют последовательность из его прошлых реакций на входные воздействия

$$\mathbf{s}^{(K)}[n] = (\mathbf{r}_{\text{мото}}[n-1], \mathbf{r}_{\text{мото}}[n-2], \dots, \mathbf{r}_{\text{мото}}[n - \frac{K}{M}])^T \quad (2)$$

либо мгновенный срез его фазовых траекторий

$$\mathbf{s}^{(K)}[n] = (\mathbf{r}_{\text{мото}}[n], \mathbf{r}'_{\text{мото}}[n], \mathbf{r}''_{\text{мото}}[n], \dots, \mathbf{r}_{\text{мото}}^{\frac{K}{M}-1}[n])^T, \quad (3)$$

причем  $K \bmod M = 0$ .

Таким образом, в процессе функционирования АМР в блок мотонейронов могут добавляться новые ассоциативные пары «стимул – реакция». Данный процесс можно рассматривать как генерацию условных рефлексов, позволяющих АМР адаптироваться к новым условиям функционирования.

### 3. Программа имитационного моделирования для проектирования и отладки алгоритмов и методов обработки сенсорных данных

Для тестирования и отладки работы предложенного адаптивного нейросетевого контура управления АМР была разработана компьютерная программа имитационного моделирования движения мобильного робота по двумерной плоскости с препятствиями. Интерфейс указанной программы представляет собой единое окно (рис. 3), оснащенное вспомогательными графическими полями и элементами управления, которые позволяют:

– загружать заранее сгенерированные виртуальные карты местности различной сложности;

- производить в некоторых пределах реконфигурацию сенсорной системы, состоящей из датчиков двух типов: датчиков препятствия и сканирующего дальномера;
- производить наблюдение за показаниями датчиков препятствий и сканирующего дальномера в неподвижной системе координат, привязанной к корпусу робота;
- загружать алгоритмы управления движением мобильного робота;
- производить масштабирование виртуального полигона;
- производить ручное управление движениями мобильного робота как с помощью клавиатуры, так и с помощью управляющих элементов;
- сохранять на диске показания сенсорной системы.

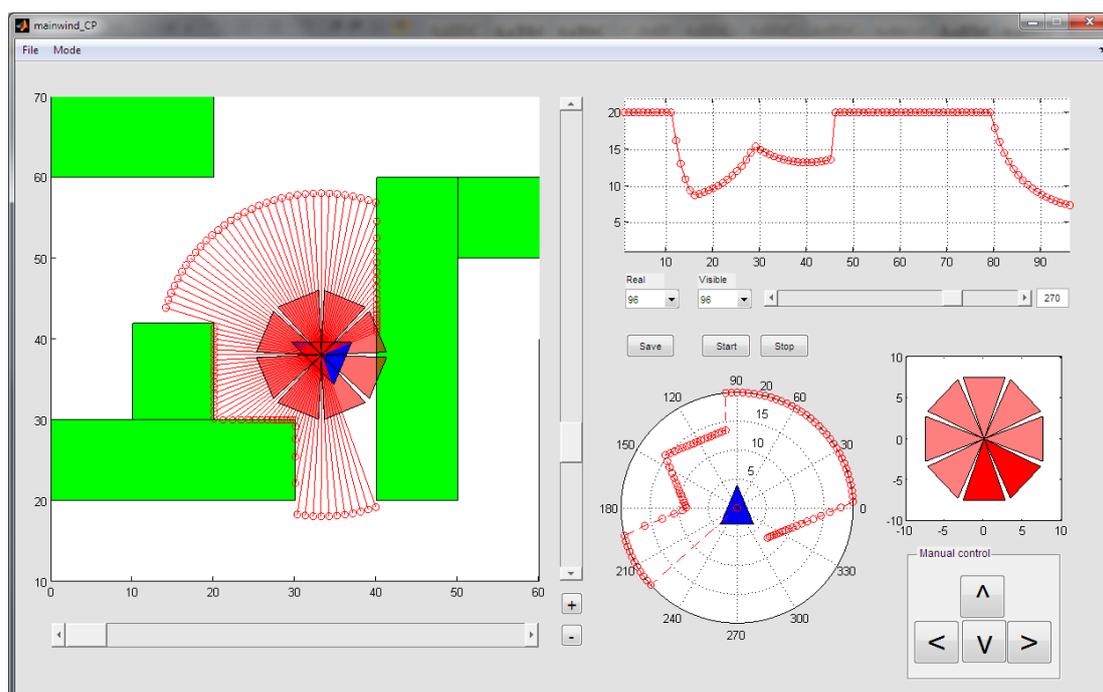


Рис. 3. Главное графическое окно приложения

На этапе проектирования программы компьютерного моделирования ставились следующие задачи: имитировать не только движения самого робота, но и реалистичный процесс съема данных с датчиков при условии наличия удобного интерфейса, позволяющего быстро и качественно получить интересующие пользователя сенсорные данные в любом положении АМР относительно преград. Разработанная имитационная модель была реализована с помощью пакета Matlab в виде отдельного программного комплекса с графическим интерфейсом, обладающим расширенными функциональными возможностями.

В разработанной программе имитационного моделирования реализованы сенсорные системы:

- ближнего действия, которые представлены восемью датчиками препятствий, равномерно расположенными по периметру корпуса робота (рис. 4, а);
- дальнего действия (лидара) (рис. 4, б). Минимальный дискретный угол поворота сканирующей головки лидара выбирается пользователем в пределах от 1 до 360°, т. е. за один полный оборот лидара сенсорная система ИСУ может получить от 1 до 360 выборок аналоговых значений расстояния до преград. При этом двухмерный угол сканирования лидара всегда центрируется относительно направления движения робота (рис. 4, в). По сравнению с датчиками препятствий сканирующий дальномер позволяет получать более точную информацию о расположении и форме препятствий. Благодаря этому АМР способен объезжать препятствия по более плавным траекториям.

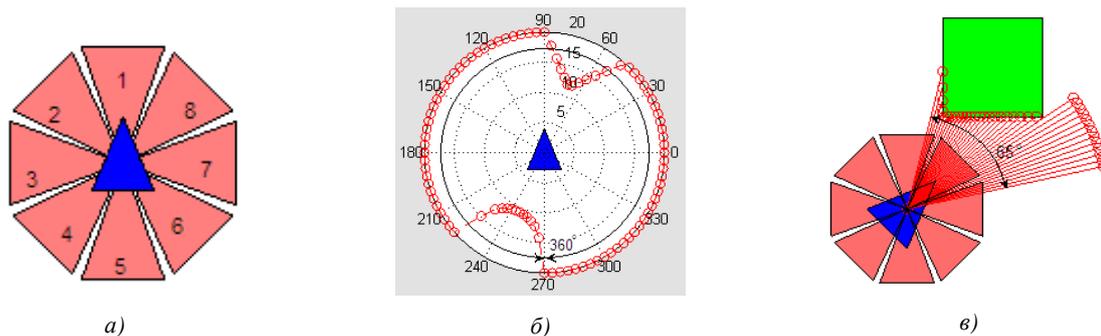


Рис. 4. Расположение и принципы действия датчиков, используемых при компьютерном моделировании:  
 а) расположение восьми датчиков препятствий; б) показания сканирующего дальномера при угле обзора в  $360^\circ$ ; в) при угле обзора  $65^\circ$

Таким образом, разработанная программа способна определять и графически отображать пересечения сканирующих лучей лидара и датчиков препятствия с преградами, которые представляют собой окружности и прямоугольники различных размеров и соотношений сторон. На основе указанных геометрических примитивов возможна имитация достаточно сложных объектов и сцен.

Самоходная платформа виртуального АМР реализована по принципу движения гусеничной самоходной платформы. Такой тип движения очень широко распространен среди конструкций наземных мобильных роботов [2]. По данному принципу могут двигаться и колесные шасси с четырьмя ведущими колесами.

Программа моделирования позволяет управлять мобильным роботом в двух режимах: автономном (*autonomous*) и ручном (*manual*), любой из которых пользователь может активировать через пункт меню Mode, расположенный в верхней части графического окна приложения. В автономном режиме мобильный робот совершает движения согласно заданным алгоритмам, которые написаны в пакете Matlab и находятся в отдельном файле с расширением \*.m. Файлы с соответствующими алгоритмами выбираются с помощью дополнительного диалогового окна, автоматически появляющегося после выбора автономного режима управления АМР. Входными параметрами для алгоритмов управления служат показания описанных выше датчиков сенсорной системы робота. Выходными данными являются команды для соответствующего направления вращения каждой из двух гусениц АМР.

Пользователь может управлять движением мобильного робота как с клавиатуры, так и с помощью манипулятора типа «мышь», активируя виртуальные клавиши, на которых отображены соответствующие направления движения. Клавиши «вверх» и «вниз» управляют движением робота вперед и назад, перемещаясь при этом на величину дискретного шага. Клавиши «вправо» и «влево» осуществляют дискретный поворот корпуса робота в соответствующую сторону вокруг своей оси.

Разработанная программа позволяет загружать и визуализировать различные карты местности. Загрузка карт реализуется через меню File путем нажатия на кнопку Open, которая вызывает диалоговое окно для загрузки соответствующего файла с расширением \*.mat.

#### 4. Моделирование адаптивного поведения АМР на основе реактивного контура управления

Рассмотрим результаты проведенного эксперимента по определению адекватности работы предложенного экстремального контура управления робототехническим аппаратом (см. рис. 2), который был реализован с помощью программы имитационного моделирования (см. рис. 3).

Эксперимент заключался в генерации реактивным контуром управления новых условных рефлексов, позволяющих АМР двигаться по виртуальной местности и адаптироваться к новым видам препятствий таким образом, чтобы расстояние между корпусом робота и встречными объектами было большим, чем дальность действия датчиков препятствий (зона безопасности).

Это достигается благодаря тому, что, с одной стороны, до начала функционирования АМР оператор как эксперт должен обучить объезжать препятствия блок безопасного движения АРТ-ДАП на основе показаний от сенсорных датчиков ближней зоны. С другой стороны, перед началом движения АМР долговременная память ИНС мотонейронов является пустой, т. е. в ней не записано ни одной эталонной пары «стимул – реакция».

Таким образом, если управляющие значения  $\mathbf{u}_{\text{мото}}^{(M)}$ , полученные от блока мотонейронов и основанные на данных сканирующего дальномера  $\mathbf{r}_{\text{мото}}^{(N_2)}$ , не противоречат управляющим значениям  $\mathbf{u}_{\text{АРТ-ДАП}}^{(M)}$  блока безопасного движения АРТ-ДАП, блок критерия оптимальности соединит выходы блока мотонейронов с входами блока драйвера двигателей.

В противном случае согласно системе правил (1) блок критерия оптимальности принудительно создаст в долговременной памяти ИНС мотонейронов такую ассоциативную пару, входной вектор  $\mathbf{r}_{\text{мото}}^{(N_2)}$  которой будет представлять собой данные от сканирующего дальномера  $q$  дискретных шагов назад, а выходной  $\mathbf{u}_{\text{мото}}^{(M)}$  (управляющий) вектор – от блока АРТ-ДАП. В результате при повторении данной ситуации блок мотонейронов выдаст такие управляющие сигналы, которые не приведут к появлению внештатного режима работы АМР (в данном случае – столкновению с препятствием).

В проведенном эксперименте разработанный адаптивный нейроконтроллер имел следующие численные параметры:  $N_1 = 8$  бит (число бинарных датчиков препятствий),  $N_2 = 5 \times 8 = 40$  бит (восьмибитное аналого-цифровое преобразование пяти выборок лидара) и  $M = 2$  бит (11 – вперед, 01 – влево, 10 – вправо, 00 – стоп).

Однако объем памяти сети ДАП, на основе которой реализован блок мотонейронов, может сохранить не более двух образов [12], что является явно недостаточным для реализации ситуационного управления АМР при движении по плоскости с препятствиями. В связи с этим в блок мотонейронов был добавлен дополнительный скрытый слой нейронов, эталонные образы которого стали промежуточными звеньями в ассоциативных парах «стимул – реакция» от входного вектора нейронов к выходному. В качестве эталонных образов принимались ортогональные векторы из матрицы Адамара. В результате добавления нового нейронного слоя блок мотонейронов стал содержать две матрицы синаптических связей  $\mathbf{W}'_{Z \times N_2}$  и  $\mathbf{W}''_{M \times Z}$ , где  $N_2$  – длина входного информационного вектора  $\mathbf{r}_{\text{мото}}^{(N_2)}$ ;  $M$  – длина выходного управляющего вектора  $\mathbf{u}_{\text{мото}}^{(M)}$ ;  $Z$  – длина промежуточного нейронного слоя, равная числу эталонных пар «стимул – реакция», необходимых для реализации управления движением робота для конкретной задачи. Таким образом, значения элементов матрицы Адамара  $A_{Z \times Z}$  должны быть записаны в реактивный контур управления до начала функционирования АМР.

На основе известной формулы функционирования сети ДАП [13] найдем значения выходного слоя  $\mathbf{u}_{\text{мото}}^{(M)}$  через вычисления значений промежуточного слоя нейронов согласно формуле

$$\mathbf{u}_{\text{мото}}^{(M)} = f \left( \mathbf{W}''_{M \times Z} \cdot f \left( \mathbf{W}'_{Z \times N_2} \cdot \mathbf{r}_{\text{мото}}^{(N_2)} + \mathbf{b}'^{(Z)} \right) + \mathbf{b}''^{(M)} \right), \quad (4)$$

где  $N_2$  и  $M$  – количество нейронов во входном и выходном слоях соответственно;  $Z$  – количество нейронов в промежуточном скрытом слое (в реализованном эксперименте  $Z = 16$ );  $\mathbf{b}'^{(Z)}$  и  $\mathbf{b}''^{(M)}$  – векторы-столбцы, содержащие значения пороговых смещений функций активации в каждом слое.

На примере (рис. 5) с помощью четырех выборочных слайдов, иллюстрирующих ключевые моменты описываемого эксперимента, показано: а) сеть АРТ-ДАП распознала преграду как образ «стена»; б) и в) на основании полученных управляющих сигналов от блока АРТ-ДАП реализован поворот робота вправо; г) поворот робота вправо реализован уже на основании управляющих сигналов от блока мотонейронов.

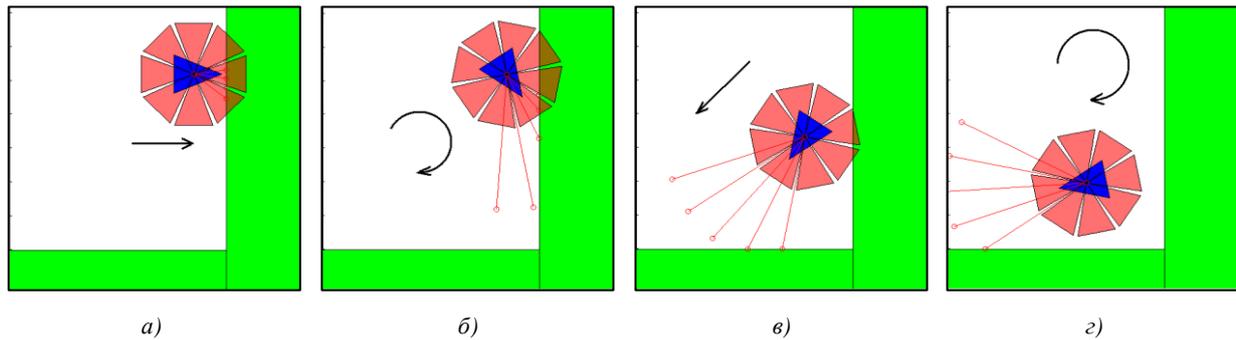


Рис. 5. Эксперимент по автоматическому добавлению в память блока мотонейронов новых образов

В процессе функционирования АМР в блок мотонейронов по правилу (1) были добавлены новые ассоциативные пары «стимул – реакция». Таким образом, данный процесс можно рассматривать как генерацию условных рефлексов, позволяющих АМР адаптироваться к новым условиям функционирования. Для определения нейроконтроллером управляющего вектора  $\mathbf{u}_{\text{мото}}^{(M)}$  по формуле (4) потребуется  $Q_{\text{мото}}^{(M)} = 9MZ(N_2 + 1) + 3M$ , а для управляющего вектора  $\mathbf{u}_{\text{АРТ-ДАП}}^{(M)}$  всего  $Q_{\text{АРТ-ДАП}}^{(M)} = 3MN_1$  элементарных операций, под которыми понимаются операции сложения, умножения, сравнения и присвоения. Другими словами, для вычисления каждого шага алгоритма управления потребуется  $Q_{\text{АРТ-ДАП}}^{(M)} + Q_{\text{мото}}^{(M)} + 3 = 11\,865$  элементарных операций (три операции для сравнения векторов  $\mathbf{u}_{\text{АРТ-ДАП}}^{(M)}$  и  $\mathbf{u}_{\text{мото}}^{(M)}$ ), что является посильным для выполнения в режиме реального времени даже при реализации нейроконтроллеров на основе однокристалльных микроконтроллеров. При этом в модельном эксперименте скорость движения АМР подбиралась таким образом, чтобы за шаг дискретного времени он проходил расстояние, равное одной десятой его длины.

### Заключение

Несмотря на то что безусловные и условные рефлексы представляют собой относительно простые функциональные схемы, на их основе в живой природе строятся разнообразные типы сложных форм поведения. В качестве безусловных и условных раздражителей выступают самые разнообразные данные, которые образуются из сложных комбинаций на выходе сенсорной системы и объединяются в различные пространственно-временные образы.

Таким образом, любое действие ИСУ, последовавшее за изменениями внешней среды, должно восприниматься как реакция памяти на это изменение, выраженная специфическим действием или цепочкой действий эффекторов. Другими словами, на введенный специфический ключевой образ адаптивный нейроконтроллер должен выдавать соответствующие управляющие сигналы-отклики. Однако для этого в нем предварительно должны быть накоплены определенные модели поведения. Так как предлагаемая модель адаптивного нейроконтроллера реализована на основе ИНС, в процессе его обучения применимы стандартные методы, используемые в нейросетевых моделях: обучение с учителем, без учителя и с подкреплением. В процессе обучения происходит изменение значений коэффициентов синаптических связей ИНС таким образом, чтобы минимизировалась ошибка при вычислении целевой функции. В описанном эксперименте в качестве целевой была использована функция минимизации числа поворотов шасси АМР, т. е. было реализовано прямолинейное движение с вынужденным объездом препятствий.

Следует заметить, что предложенному адаптивному нейроконтроллеру присущи не только достоинства, но и недостатки, которыми обладают системы правил. К ним можно отнести тот факт, что классическая система правил, так же как и монолитная ИНС в теории обучения с подкреплением, на практике способна хорошо обучиться только одной форме поведения. Серьезной проблемой для систем правил является также сходимость к оптимальному с некоторой точки зрения набору правил, который не всегда гарантирует адекватную реакцию в различных ситуациях. В связи с этим целью дальнейших исследований являются разработка и реали-

зация модели интеллектуальной иерархической системы управления, которая позволит решить указанную проблему.

### Список литературы

1. Новые методы управления сложными системами / под общ. ред. В.М. Лохина и И.М. Макарова. – М. : Наука, 2004. – 333 с.
2. Юревич, Е.И. Основы робототехники : учеб. пособие / Е.И. Юревич. – 3 е изд., перераб. и доп. – СПб. : БХВ-Петербург, 2010. – 368 с.
3. Жданов, А.А. Автономный искусственный интеллект / А.А. Жданов. – 2-е изд. – М. : БИНОМ, 2009. – 359 с.
4. Гаазе-Рапопорт, М.Г. От амебы до робота: модели поведения / М.Г. Гаазе-Рапопорт, Д.А. Поспелов. – М. : Наука, 1987. – 288 с.
5. Сигеру, О. Нейроуправление и его приложения / О. Сигеру, Х. Марзуки, Ю. Рубия. – М. : ИПРЖР, 2000. – 272 с.
6. Прокопович, Г.А. Применение гетероассоциативных нейронных сетей для записи и восстановления информации / Г.А. Прокопович // Информатика. – 2012. – № 2 (34). – С. 38–49.
7. Прокопович, Г.А. Модель нейросетевой ассоциативной памяти для управления манипулятором / Г.А. Прокопович // Информатика. – 2012. – № 3 (35). – С. 16–25.
8. Прокопович, Г.А. Нейросетевая модель для реализации поисковых движений мобильного робота / Г.А. Прокопович // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем : материалы III Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 21–23 февраля 2013 г. / редкол. : В.В. Голенков (отв. ред.) [и др.]. – Минск : БГУИР, 2013. – С. 483–488.
9. Прокопович, Г.А. Нейросетевой блок памяти для адаптивной работы сложных технических систем в динамической среде / Г.А. Прокопович // Информатика. – 2010. – № 2 (26). – С. 54–65.
10. Прокопович, Г.А. Бионическая структура иерархической распределенной системы управления автономными мобильными роботами / Г.А. Прокопович // Искусственный интеллект. – 2013. – № 1. – С. 181–190.
11. Прокопович, Г.А. Адаптивный нейросетевой классификатор / Г.А. Прокопович // Информатика. – 2009. – № 3 (23). – С. 68–81.
12. The capacity of the Hopfield associative memory / R.J. McEliece [et al.] // IEEE Transactions on Information Theory. – 1987. – Vol. 33, no 4. – P. 461–482.
13. Kosko, B. Bidirectional associative memories // B. Kosko / IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – 1988. – Vol. 18, no. 1. – P. 49–60.

Поступила 30.10.2014

*Объединенный институт проблем  
информатики НАН Беларуси,  
Минск, Сурганова, 6  
e-mail: rprakovich@robotics.by*

**R.A. Prakapovich**

### **SIMULATION OF ADAPTIVE BEHAVIOR IN THE CONTEXT OF SOLVING AN AUTONOMOUS ROBOTIC VEHICLE MOTION TASK ON TWO-DIMENSIONAL PLANE WITH OBSTACLES**

An adaptive neurocontroller for autonomous robotic vehicle control, which is designed to generate control signals (according to preprogrammed motion algorithm) and to develop individual reactions to some external impacts during functioning process, that allows the robot to adapt to external environment changes, is suggested. To debug and test the proposed neurocontroller a specially designed program, able to simulate the sensory and executive systems operation of the robotic vehicle, is used.

УДК 004.94: 004.9.032.26

П.К. Шалькевич<sup>1</sup>, С.П. Кундас<sup>2</sup>, И.А. Гишкелюк<sup>1</sup>

## РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ЗАДАЧИ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ВЛАГОПЕРЕНОСА В ПРИРОДНЫХ ДИСПЕРСНЫХ СРЕДАХ

*Предлагаются результаты программной реализации в пакете Matlab разработанного авторами алгоритма параллельных вычислений задачи неизотермического влагопереноса в природных дисперсных средах. Проведенные сравнительные исследования производительности вычислений модели переноса загрязняющих веществ по предложенному алгоритму и с помощью пакета Matlab на уровне стандартных инструкций показали значительное сокращение времени вычислений.*

### Введение

С момента аварии на Чернобыльской АЭС прошло более 28 лет, однако все еще не представляется возможным оценить полный ущерб, который она нанесла, поскольку причинно-следственные связи, отражающие воздействие радиоактивного загрязнения территории на различные стороны жизнедеятельности населения, достаточно сложны [1]. При этом особую опасность представляет распространение радиоактивных нуклидов цезия-137 и стронция-90, поступление которых в пищевые продукты осуществляется в основном почвенным путем [2]. Поскольку период полураспада указанных радионуклидов составляет 27–33 года и этот процесс связан с выделением  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения [3], задачи анализа и прогнозирования их миграции в почве имеют непреходящую актуальность. Перспективным для решения указанных задач является применение методов математического и компьютерного моделирования [4].

### 1. Моделирование миграции загрязняющих веществ в почве

Можно утверждать, что при моделировании миграции загрязняющих веществ, особенно радионуклидов, в почве важную роль играют модели и методы, позволяющие осуществлять достоверные долгосрочные прогнозы. В большинстве современных программных комплексов, предназначенных для моделирования сложных физических процессов, численная реализация разработанных моделей осуществляется с помощью метода конечных элементов (МКЭ) [5–7]. По сравнению с методом конечных разностей (МКР) МКЭ не только имеет меньший порядок погрешности [8], но и позволяет произвольно выбирать форму обрабатываемой области путем варьирования количества узлов сетки. Кроме того, одним из немаловажных достоинств МКЭ является то, что свойства материалов смежных элементов не должны быть обязательно одинаковыми. Это позволяет решать задачи моделирования миграции радионуклидов в средах, состоящих из различных материалов, что особенно актуально для природных дисперсных сред, так как они, как правило, являются гетерогенными [4].

В одномерном виде математическую модель переноса загрязняющих веществ в природных дисперсных средах при неизотермическом влагопереносе можно представить в виде двух систем уравнений [4]:

– переноса тепла и влагопереноса, решаемой относительно температуры и давления жидкости,

$$\left| \begin{array}{l} C_v \frac{\partial T}{\partial t} - L \frac{\partial \theta_{\text{liq}}}{\partial t} + L \rho_{\text{liq}} \nabla v_{\text{liq}} - \nabla (\lambda \nabla T) \\ C_{\text{hv}} \frac{\partial T}{\partial t} + C_{\text{wp}} \frac{\partial P_{\text{liq}}}{\partial t} - \nabla (K_{\text{hv}} \nabla T) - \nabla (K_{\text{wv}} \nabla P_{\text{liq}} - K_w \rho_{\text{liq}} g \nabla D) \end{array} \right| = 0; \quad (1)$$

– конвективной диффузии и кинетики

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_{\text{liq}} \frac{\partial C}{\partial t} + C \frac{\partial \theta_{\text{liq}}}{\partial t} + \rho_b \frac{\partial a}{\partial t} = \nabla (\theta_{\text{liq}} \mathbf{D} \nabla C - \mathbf{u} C) - \lambda \theta_{\text{liq}} C - \lambda \rho_b K_d C \\ \rho_b \frac{\partial a}{\partial t} = \beta \rho_b (K_d C - a) \end{array} \right. = 0. \quad (2)$$

Приведенная математическая модель вычисляется при помощи МКЭ, и ее одномерный случай реализован в рамках модуля Chemigmod программного комплекса SPS (Simulation of Processes in Soil – моделирование процессов в почве) [4]. Однако при всех преимуществах этой модели даже при ее одномерной реализации встает вопрос о больших временных затратах при долговременном прогнозировании, так как в этом случае необходимо использовать большое количество конечных элементов и узлов сетки и расчет на персональном компьютере может выполняться более 20 ч, что в прикладных применениях в реальных производственных условиях является неприемлемым. Эта проблема становится еще более актуальной при решении трехмерных задач, для решения которых требуется применение специальной высокопроизводительной вычислительной техники, что часто представляет значительные трудности для большинства пользователей. Визуализация вариантов решения одномерной и трехмерной задач показана на рис. 1.

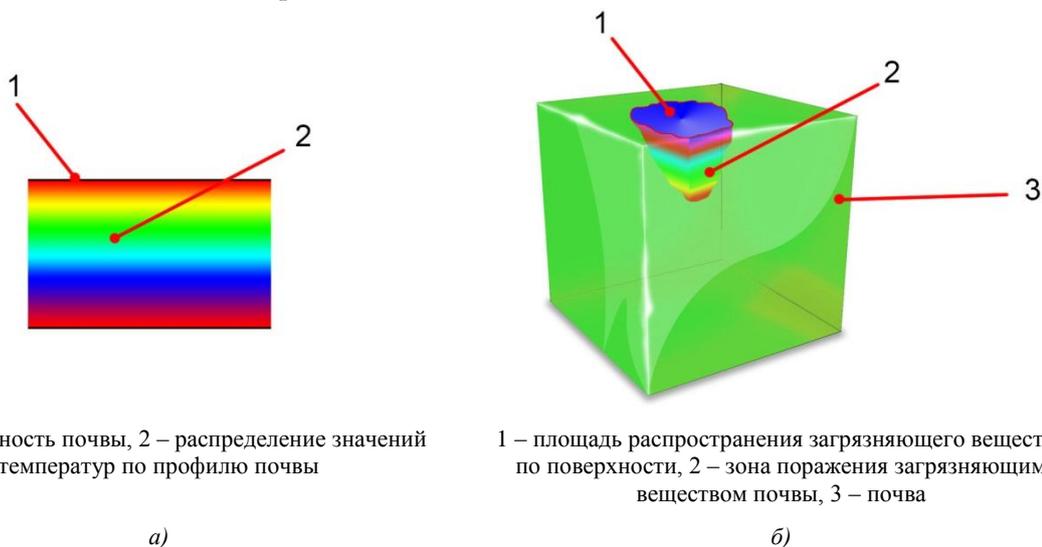


Рис. 1. Примеры решения задач по прогнозу переноса загрязняющих веществ в природных дисперсных средах при неизотермическом влагопереносе: а) одномерной; б) трехмерной

Для обоснования выбора методики параллельного решения рассматриваемой задачи было проведено исследование влияния на длительность расчетов с учетом следующих параметров модели:

- количества конечных элементов в численной реализации уравнения ( $n$ , ед.);
- расстояния, для которого производится оценка переноса тепла ( $l$ , м);
- долгосрочности прогнозирования ( $t$ , с).

Осуществлялось моделирование миграции стронция-90 в дерново-подзолистой заболоченной почве со следующими физическими свойствами: рН = 4,8, содержанием гумуса – 4,06 %, содержанием P<sub>2</sub>O – 169 мг/кг, K<sub>2</sub>O – 503 мг/кг, CaO – 503 мг/кг, MgO – 128 мг/кг.

Расчеты проводились в программном пакете Matlab. Результаты исследований показаны на рис. 2.

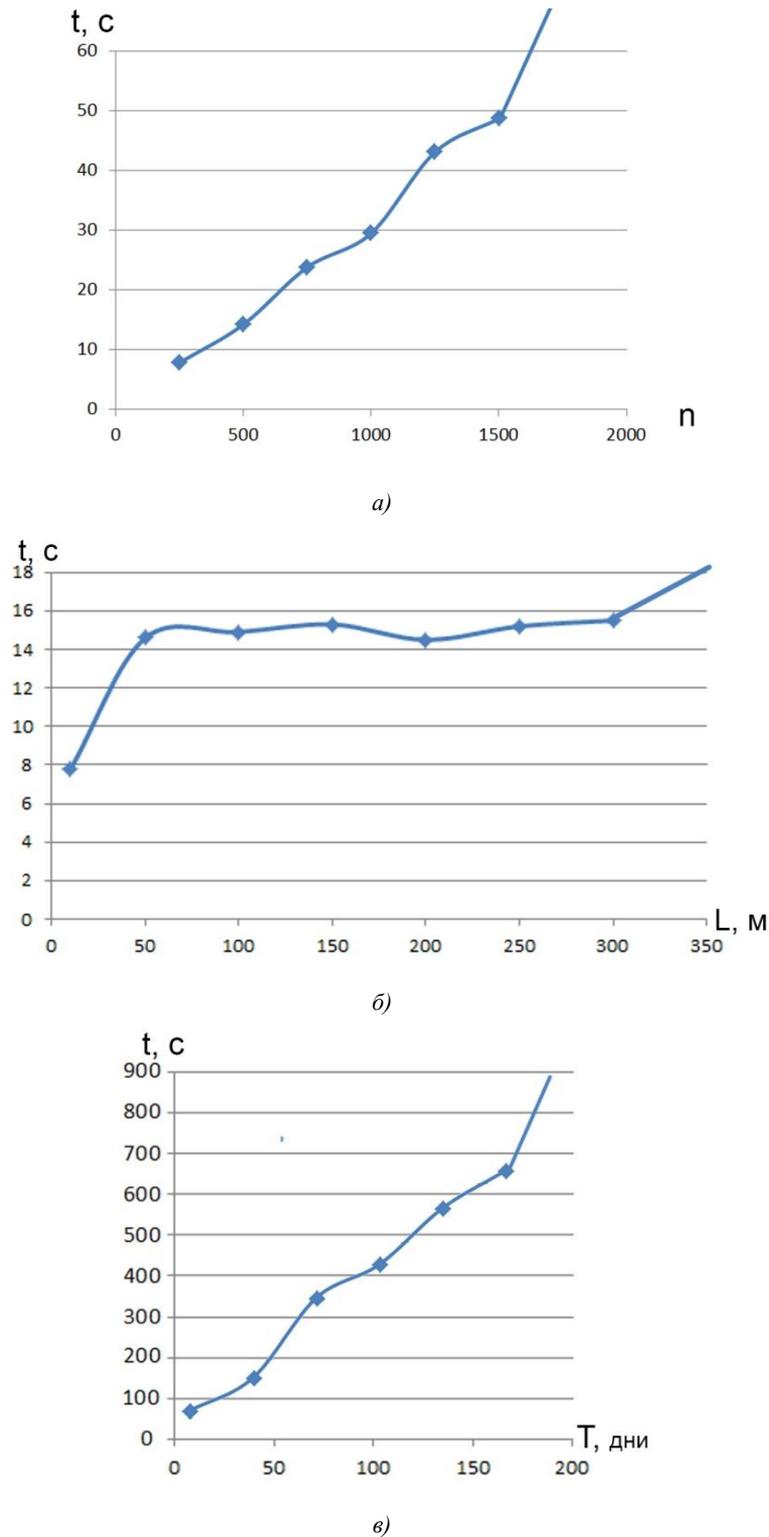


Рис. 2. Зависимость времени расчета уравнения теплопроводности: а) от количества элементов сетки (при  $L = 10$  м); б) от расстояния, на которое моделируется перенос тепла; в) от долгосрочности прогноза

Представленные результаты показывают, что наибольшее влияние на длительность вычислений оказывают долгосрочность прогнозирования и количество используемых конечных элементов. При этом совершенно очевидно, что при увеличении значений всех трех параметров одновременно будет наблюдаться более значительное увеличение длительности расчетов,



Основой для программного модуля Chemigmod в комплексе SPS являлась программа, написанная в среде программного пакета Matlab, так как он позволяет в полной мере использовать МКЭ для решения дифференциальных уравнений. В связи с этим указанный пакет применен в настоящей работе для практической реализации предложенного параллельного алгоритма [10].

Исходный код программы для численного решения уравнения (2) методами, описанными в [4], в программе Matlab будет содержать два основных цикла – *while* и *for*, которые обеспечивают рекуррентность алгоритма [11]. Цикл *while* используется для реализации расчета шага по времени, а цикл *for* – для расчета дифференциальных уравнений по методу Ньютона – Рафсона. Для реализации параллельного алгоритма [10] в программе Matlab использовано приложение Parallel Computing Toolbox [12], которое предоставляет ряд высокоуровневых конструкций (одной из которых является параллельный цикл *for* (*parfor*)) для конвертации последовательных приложений, обеспечивающих их работу на многоядерных процессорах, кластерах и GPU [13]. В соответствии с методами, описанными в [10], для получения параллельно выполняемой программы на уровне распараллеливания алгоритма необходимо выделить массив данных в существующей последовательной программе и построить на его основе некоторое число меньших массивов, которые могут решаться параллельно на нескольких ядрах компьютера.

Относительно решаемой задачи подходящие массивы данных обрабатываются в цикле *for*, и явным методом для получения параллельной программы будет замена в коде последовательной программы цикла *for* на параллельный цикл *parfor* с использованием Parallel Computing Toolbox. Что же касается цикла *while*, которым задается шаг по времени, то он не может быть распараллелен ввиду нелинейности решения относительно времени.

Использование параллельного цикла *parfor* в среде Matlab реализует параллельно выполняемую программу, однако лишь замена оператора *for* на *parfor* не гарантирует получение работающей программы. Рассматриваемый случай не является исключением, поэтому для правильного функционирования программы алгоритм последовательного расчета был преобразован. Это связано с ограничением цикла *parfor* по работе с типами переменных, а также запретом на модификацию значения переменных внутри цикла [14].

Преобразование алгоритма осуществляется с помощью использования массива ячеек Matlab. Особенностью массива ячеек является то, что они могут содержать разные типы данных, объединенные одной переменной, а вектор ячеек может менять тип данных в каждом элементе. Таким образом, предложенная реализация программы является более требовательной к ресурсам оперативной памяти, однако позволяет выполнять моделирование, задействовав все ядра центрального процессора.

Для проведения исследований разработанной программы использовался персональный компьютер на базе шестиядерного процессора AMD FX 6300. Расчет проводился с учетом следующих параметров: время прогнозирования – двое суток, значение радиуса миграции – 10 м (табл. 1). Была проведена также оценка эффективности параллельных вычислений. Для этих целей применен коэффициент  $\delta$ , который показывает, какой процент времени процессоры используют на проведение непосредственно вычислительных операций:

$$\delta = \frac{t_{\text{пос}}}{k \cdot t_{\text{пар}}} \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где  $t_{\text{пос}}$  – время, затраченное на последовательное вычисление;  $t_{\text{пар}}$  – время, затраченное на параллельное вычисление;  $k$  – количество вычислительных потоков.

Таблица 1

Сравнительные результаты решения задачи миграции загрязняющих веществ в почве с помощью последовательного и параллельного алгоритмов стандартными средствами операционной системы и программного пакета Matlab

Затраченное время при последовательном расчете, с	Затраченное время при использовании шести ядер (распараллеливание на уровне задач), с	Количество элементов сетки $n$	Эффективность распараллеливания $\delta$ , %	Ускорение, %
7,8	7,3	250	17,8	107
14,2	14,0	500	16,9	101
23,8	23,3	750	17,0	102
29,5	29,2	1000	16,8	101
43,1	42,4	1250	16,9	102
48,7	47,9	1500	17,0	102
2962,0	2551,9	10 000	19,3	116

Как видно из представленных результатов, при распараллеливании вычислений операционной системой и программным пакетом Matlab на уровне стандартных инструкций достигается незначительное ускорение расчетов (до 116 %). При использовании предложенного авторами алгоритма ускорение более существенное.

Согласно закону Амдала [15] можно дать оценку максимального ускорения, достижимого для любого параллельного алгоритма с долей последовательных операций. Исходя из специфики решаемой задачи, а также особенностей цикла *parfor*, приблизительно 70 % операций при расчете уравнения теплопроводности выполняются последовательно. Таким образом, при наибольшем экспериментальном значении ускорения параллельного алгоритма 141 % (табл. 2) максимально возможное значение составит 142 %.

Таблица 2

Сравнительные результаты решения задачи миграции загрязняющих веществ в почве с помощью последовательного и разработанного параллельного алгоритмов

Затраченное время при последовательном расчете, с	Затраченное время при использовании шести ядер (распараллеливание на уровне алгоритма), с	Количество элементов сетки $n$	Эффективность распараллеливания $\delta$ , %	Ускорение параллельного алгоритма, %	Прирост ускорения по сравнению со стандартным распараллеливанием, %
7,8	15	250	8,3	52	49
14,2	13,7	500	17,3	104	103
23,8	17,9	750	22,2	133	130
29,5	20,9	1000	23,5	141	140
43,1	31,9	1250	22,5	135	132
48,7	39,9	1500	20,3	122	120
2962,0	2130,9	10 000	23,2	139	120

Учитывая тенденцию повышения эффективности разработанного алгоритма при большом числе конечных элементов, которое необходимо для повышения точности расчетов (в особенности в 3D-реализации), можно говорить о перспективности его применения для решения практических задач в рассматриваемой предметной области.

### Заключение

Разработанный алгоритм параллельных вычислений задачи неизотермического влагопереноса в природных дисперсных средах практически реализован в программном пакете Matlab. Учитывая, что вычисления осуществляются с шагом по времени, алгоритм фактически является частично последовательным, частично параллельным. Параллельные вычисления применяются

в части алгоритма, который отвечает за решение дифференциальных уравнений методом Ньютона – Рафсона, и реализованы при помощи параллельного цикла *parfor*, который разбивает используемые массивы данных на массивы меньших размеров и осуществляет их расчет на ядрах компьютера параллельно, равномерно распределяя нагрузку. Массивы данных, с которыми может работать цикл *parfor*, были получены путем применения массивов ячеек Matlab.

Разработанный алгоритм показывает стабильное ускорение вычислений, стремящееся к максимально возможному для решаемой задачи. Этот принцип полностью соответствует специфике решения задачи долгосрочного прогнозирования, позволяя экономить до 41 % машинного времени по сравнению с последовательным алгоритмом расчета и до 20 % по сравнению с параллельным, полученным выполнением стандартных программных процедур, что дает возможность ускорить анализ миграции загрязняющих веществ в почве, особенно при ее трехмерной реализации. При этом, принимая во внимание такое свойство разработанного алгоритма, как равномерное распределение параллельно выполняемых задач по процессорам, ускорение расчета может быть увеличено путем применения ЭВМ с большим числом ядер центрального процессора.

### Список литературы

1. Последствия чернобыльской катастрофы для Беларуси // Департамент по ликвидации последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС МЧС Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://www.chernobyl.gov.by/index.php?option=com\\_content&view=article&id=105&Itemid=54/](http://www.chernobyl.gov.by/index.php?option=com_content&view=article&id=105&Itemid=54/). – Дата доступа : 07.09.2014.
2. Основные пути миграции радионуклидов стронция-90 и цезия-137 в окружающей среде // ГУ «Минский областной центр гигиены, эпидемиологии и общественного здоровья» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://gigiena.minsk-region.by/ru/obraz/statyi?id=1011/>. – Дата доступа : 07.09.2014.
3. Агеец, В.Ю. Накопление радионуклидов цезия-137 и стронция-90 сельскохозяйственными культурами в зависимости от свойств почв / В.Ю. Агеец // Почвоведение и агрохимия. – 1996. – № 29. – С. 249–258.
4. Компьютерное моделирование миграции загрязняющих веществ в природных дисперсных средах / С.П. Кундас [и др.]. – Минск : МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2011. – 212 с.
5. ANSYS Theory Manual. ANSYS Release. – SAS IP, Inc., 2001. – 1266 p.
6. COMSOL Multiphysics. User's Guide. – COMSOL AB, 2007. – 588 p.
7. MSC/NASTRAN Numerical Methods. User's Guide. – MSC, 1998. – 297 p.
8. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич. – М. : Мир, 1986. – 318 с.
9. Шалькевич, П.К. Анализ эффективности использования программных пакетов PVM и MPI для параллелизации вычислений при моделировании неізотермического влагопереноса в природных дисперсных средах / П.К. Шалькевич // Математическое и компьютерное моделирование систем и процессов. – 2013. – № 3. – С. 46–50.
10. Шалькевич, П.К. Алгоритм параллельных вычислений задачи неізотермического влагопереноса в природных дисперсных средах / П.К. Шалькевич, С.П. Кундас, И.А. Гишкелюк // Доклады БГУИР. – 2014. – № 5 (83). – С. 90–94.
11. Наместников, С.М. Основы программирования в MatLab / С.М. Наместников. – Ульяновск : УлГТУ, 2011. – 55 с.
12. Оленев, Н.Н. Параллельное программирование в MATLAB и его приложения / Н.Н. Оленев, Р.В. Печенкин, А.М. Чернецов. – М. : Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН, 2007. – 120 с.
13. Parallel Computing Toolbox // Центр компетенций MathWorks [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://matlab.ru/products/parallel-computing-toolbox/>. – Дата доступа : 07.09.2014.
14. Documentation Centre // MathWorks [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.mathworks.com/help/matlab/>. – Дата доступа : 07.09.2014.

15. Карпов, В.Е. Введение в распараллеливание алгоритмов и программ / В.Е. Карпов // Компьютерные исследования и моделирование. – 2010. – Т. 2, № 3. – С. 231–272.

Поступила 18.09.2014

<sup>1</sup>Международный государственный  
экологический университет им. А.Д. Сахарова,  
Минск, Долгобродская, 23  
e-mail: pavel.shalkevich@gmail.com  
gishkeluk@iseu.by

<sup>2</sup>Белорусский национальный  
технический университет,  
Минск, пр. Независимости, 65  
e-mail: kundas@tut.by

**P.K. Shalkevich, S.P. Kundas, I.A. Gishkeluk**

**IMPLEMENTATION OF THE PARALLEL ALGORITHM OF NONISOTHERMAL  
HEAT AND MOISTURE MIGRATION TASK SIMULATION IN NATURAL  
DISPERSE ENVIRONMENTS**

The results of the developed algorithm of parallel computing program implementation of non-isothermal moisture transfer in natural dispersed environments in the Matlab package are considered. Comparative studies of the computing model performance of contaminants transport by the proposed algorithm and use of Matlab at the standard instruction level showed a significant reduction in computation time.

УДК 004.9

В.А. Рыбак, Х.М. Сулайман

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА РЫНКЕ ФОРЕКС

*Предлагается технология интеллектуальной поддержки принятия решений на рынке Форекс, включающая алгоритмы формирования торговых сигналов, правила формирования обучающей выборки с учетом технических индикаторов, имеющих наибольшую корреляционную связь с ценой, а также метод снижения количества убыточных сделок. Последний базируется на анализе волновой структуры рынка, при этом начало цикла (волну номер один) предлагается идентифицировать с применением осциллятора Билла Вильямса (Awesome oscillator). Описывается технологическая цепочка построения нейронечеткой модели с использованием пакета Matlab.*

### Введение

Международный валютный рынок Форекс существует уже более 35 лет, ежедневный оборот на нем превышает 4 трлн долл. США. Вместе с тем стратегии и тактики прибыльной работы на данном рынке меняются довольно часто. Развитие современных вычислительных средств и программного обеспечения позволяет использовать новейшие информационные технологии для повышения качества работы трейдеров и снижения субъективизма в принятии решений.

Существующие на сегодняшний день механические торговые системы (МТС) основываются, как правило, на одном или нескольких технических индикаторах и редко используют элементы искусственного интеллекта. Те немногочисленные решения, которыми оперируют нейронные сети и генетические алгоритмы, отличаются сложностью настройки, обучения и тестирования, что делает их непригодными для использования широким кругом пользователей.

В англоязычном сегменте научных публикаций данному вопросу уделяется большое внимание, так как он актуален для многих тысяч трейдеров, зарабатывающих на рынке Форекс. Однако в Республике Беларусь практически полностью отсутствуют научные работы по данному вопросу.

Исследованиями указанных вопросов занимались А. Элдер, Т.Р. Демарк, А.А. Куликов, С.Б. Акелис, С. Половицкий и др. [1–8]. Вместе с тем разработка методов и технологий поддержки принятия решений на рынке Форекс с использованием элементов искусственного интеллекта остается важной научной проблемой мирового уровня.

### 1. Искусственные нейронные сети как инструмент интеллектуальной поддержки принятия решений

Идея исследований заключается в том, чтобы использовать искусственные нейронные сети (ИНС) в качестве инструмента интеллектуальной поддержки принятия решений на рынке Форекс, т. е. сформировать репрезентативную обучающую выборку, которая бы позволила ИНС прогнозировать изменения курсов валют исходя из некоторых входных параметров.

Для получения реальных хронологических данных об уровне цен на валютном рынке была использована наиболее распространенная торговая платформа – MetaTrader версии 4. В качестве валютной пары на основании наибольшего объема осуществляемых сделок была выбрана пара «доллар США – евро». Временной интервал графиков торговли может быть любым, но с учетом волатильности предпочтительнее выглядит среднесрочная стратегия на четырехчасовых графиках.

С помощью встроенных функций программы MetaTrader была сформирована история котировок за прошедший период в виде отдельного файла. Записями в нем являются строки, состоящие из даты и времени котировки, значений открытия, максимума, минимума и закрытия интервала, а также объема торгов.

Для обработки полученной информации был разработан алгоритм, который позволил выделить точки входа в рынок – сигналы на покупку либо продажу. Идея алгоритма следующая: просматривая изменения цен с текущего момента на несколько периодов вперед, определяется максимальное отклонение вверх либо вниз. При этом, если движение превысило уровень допустимого риска в обе стороны, подается сигнал «ноль» – находится вне рынка. Если положительное отклонение больше отрицательного – сигнал на продажу (1), меньше – на покупку (-1). Таким образом сформированный массив является последовательностью торговых сигналов и используется при обучении ИНС в качестве выходных параметров.

Для выделения входных параметров предложено провести анализ существующих технических индикаторов на предмет степени их связи с ценой. С этой целью был проведен корреляционный анализ между наиболее распространенными техническими индикаторами, используемыми трейдерами, и сформированным рядом торговых сигналов. Результат представлен в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты корреляции между значениями ряда торговых сигналов и индикаторами

Обозначение индикатора	Название индикатора	Коэффициент корреляции
MACD	Схождение/расхождение скользящих средних (Moving Average Convergence/Divergence)	-0,0795
MACD signal	Сигнальная линия MACD	-0,1065
MACD-signal	Разность между MACD и сигнальной линией	0,0734
AC	Технический индикатор ускорения/замедления (Acceleration/Deceleration)	
AD	Индикатор накопления/распределения (Accumulation/Distribution)	-0,2610
Alligator	Аллигатор (Bill Williams' Alligator)	-0,3116
Gator	Гатор осциллятор (Gator Oscillator)	0,0788
ADX	Индекс среднего направления движения (Average Directional Movement Index, ADX)	0,1072
ATR	Средний истинный диапазон (Average True Range, ATR)	0,0055
AO	Замечательный осциллятор Билла Вильямса (Awesome Oscillator, AO)	-0,0316
BearsPower	Индикатор медвежьей силы	-0,0164
Bands	Полосы Боллинджера (Bollinger Bands®, BB)	-0,2950
BullsPower	Индикатор бычьей силы	-0,0057
CCI	Индекс товарного канала (Commodity Channel Index, CCI)	-0,0312
DeMarker	Индикатор Демарка (DeMarker, DeM)	-0,0600
Envelopes	Индикатор Огибающие линии (Конверты, Envelopes)	-0,3114
Force	Индекс силы (Force Index, FRC)	0,0087
Ichimoku	Индикатор Ишимоку Кинко Хайо (Ichimoku Kinko Hyo)	-0,2783
MFI	Индекс денежных потоков (Money Flow Index, MFI)	0,0076
OsMA	Индикатор скользящей средней осциллятора (Moving Average of Oscillator)	0,0734
SAR	Параболическая система SAR (Parabolic SAR, Stop & Revers)	-0,2963
RSI	Индекс относительной силы (Relative Strength Index, RSI)	-0,0845
RVI	Индекс относительной бодрости (Relative Vigor Index, RVI)	-0,0636
StdDev	Стандартное отклонение (Standard Deviation, StdDev)	-0,0112
Stochastic	Стохастический осциллятор (Stochastic Oscillator)	-0,0179
WPR	Технический индикатор Процентный диапазон Вильямса (Williams' Percent Range, %R)	-0,0371

Из табл. 1 видно, что наибольший по модулю коэффициент корреляции имеют следующие индикаторы: AD, Alligator, Bands, Envelopes, Ichimoku и SAR.

Вместе с тем проведенные исследования показали, что хотя в чистом виде скользящая средняя (MACD signal) имеет невысокую степень связи, разность этого индикатора с различными временными параметрами очень сильно коррелирует со значениями торговых сигналов. В результате анализа были определены наиболее подходящие значения для данного параметра: 140 и 120.

Для определения тех индикаторов, значения которых будут использованы в качестве входных параметров нейронной сети, исследуем корреляционную связь их значений на графиках различных временных периодов (табл. 2).

Таблица 2

Коэффициенты корреляции для выбранных индикаторов на различных таймфреймах

Период, ч	AD	Alligator	Bands	Envelopes	Ichimoku	SAR	MA140-MA120
1	-0,1887	-0,4013	-0,3804	-0,4119	-0,4214	-0,4307	0,2721
4	-0,2611	-0,4638	-0,4694	-0,4884	-0,4715	-0,4439	0,5867
24	0,1122	-0,3219	-0,1819	-0,5647	-0,4128	-0,3114	0,5799

Анализируя представленные в табл. 2 данные, необходимо отметить изменение знака у индикатора AD на дневном графике. Этот факт требует исключения его из перечня индикаторов, значения которых будут в дальнейшем использованы для формирования обучающей выборки и поддержки принятия решений. Для остальных индикаторов сильная статистическая связь их значений с торговыми сигналами сохранилась. При этом с учетом размера выборки ( $N = 1000$ ) и критических значений коэффициента корреляции (0,1460) величина ошибки  $p$  составляет 0,001, т. е. с вероятностью 99,9 % выявленные связи являются статистически значимыми.

Так, обучающая выборка для нейронной сети будет состоять из семи рядов, первые шесть из которых будут являться входными параметрами, а седьмой – рядом торговых сигналов.

Для максимизации получения прибыли и снижения рисков алгоритм формирования торговых сигналов был модифицирован. По-прежнему в качестве исходных данных используется ретроспективный ценовой ряд, но на выходе алгоритм предлагает максимальное значение отклонения от текущей цены в пунктах за предстоящие несколько периодов (изменяемый параметр). При этом отрицательное значение говорит о возможности открытия позиции на покупку с уровнем дохода в указанное количество пунктов, положительное значение – о продаже.

Для построения нейронечеткой системы воспользуемся пакетом Matlab, предоставляющим возможность проектировать нейронные сети и работать с нечеткими множествами. Для примера сформируем текстовый файл с тремя рядами: первые два – значения технических индикаторов (Envelopes и MA140-120), имеющих наибольший коэффициент корреляции (согласно табл. 2 период составляет 4 ч); третий – торговые сигналы, полученные в результате выполнения модифицированного алгоритма.

После настройки системы ошибка обучения составляет 123,6. Если увеличить число вершин второго уровня сети с трех до пяти, а количество циклов обучения установить равным 50, то ошибка обучения снизится до 104,5.

Как показали проведенные исследования, в среднем соотношение прибыльных сделок к убыточным при использовании описанной технологии составляет семь к трем.

Таким образом, предложена технология создания и использования нейронечеткой системы для поддержки принятия решений на валютном рынке. При этом точность разработанной модели превосходит точность линейной и квадратичной регрессий.

На рис. 1 показан пример использования нейронечеткой модели для получения прогноза изменения валютного курса.

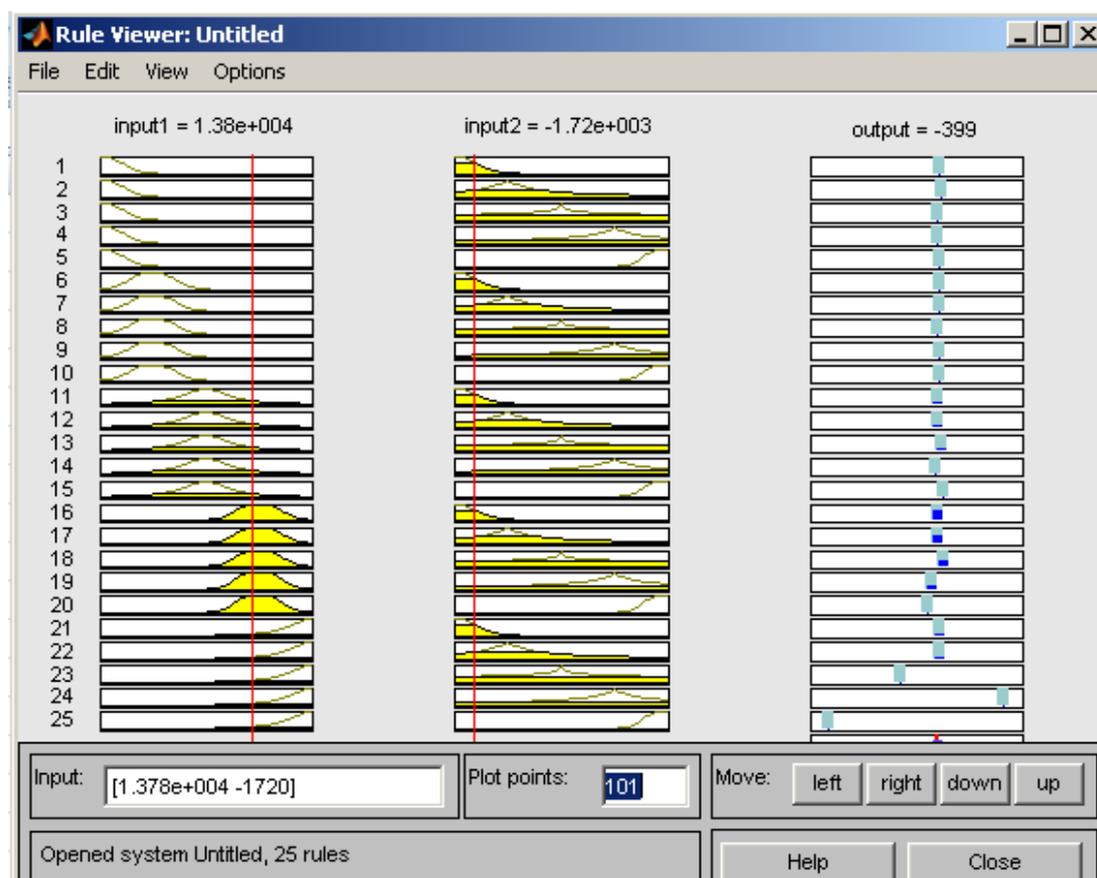


Рис. 1. Получение прогноза от нейронечеткой модели

## 2. Технология снижения количества убыточных сделок на основании волновой структуры рынка

Для дальнейшего снижения количества убыточных сделок предложена соответствующая технология. Суть ее заключается в том, что генерируемые механической торговой системой сигналы на открытие сделки должны фильтроваться по определенным правилам. Наиболее оправданным для этих целей является применение теории Эллиотта, в соответствии с которой все движение на рынке Форекс представляет собой набор волн, при этом каждая отдельная волна полного цикла, в свою очередь, является полным циклом более низкого уровня (временного диапазона) [2]. Для использования данной теории в работе МТС необходимо, определив структуру волн, выделить точки, наиболее благоприятные для входа в рынок. Этой проблеме посвящены работы С. Половицкого, который существенно продвинул классическую теорию Эллиотта и адаптировал ее для современных условий Форекса [5].

С. Половицкий выделяет несколько точек, по которым вход в рынок представляется наиболее целесообразным: первая точка – после окончания предполагаемой четвертой волны, вторая – в предполагаемой второй волне, третья – вход в третью подволну третьей волны, четвертая – в удлинение третьей волны, пятая – после формирования пятой волны и шестая – у основания предполагаемой третьей волны. При этом вход в третью подволну третьей волны означает, что по текущему временному диапазону была идентифицирована третья волна, при этом сама волна по таймфрейму более низкого порядка также сформирована тремя волнами.

Для использования выделенных точек в процессе торговли необходимо автоматизировать разметку рынка на основании волновой теории. Как справедливо отмечает С. Половицкий, существующий инструментарий делает это недостаточно точно. Поэтому авторами был предложен новый подход, призванный повысить адекватность определения волновой структуры, одним из основных отличий которого является использование осциллятора АО для иден-

тификации первой волны. При этом, если индикатор АО пересекает нулевую линию, образуя бугорок, можно говорить, что это первая волна на рассматриваемом таймфрейме (рис. 2).

С учетом вышеизложенного был разработан алгоритм определения волновой структуры валютного рынка, который предусматривает следующие шаги:

1. История котировок (цена закрытия каждого бара) заносится в массив  $A$ .
2. Путем просмотра элемента массива  $A$  формируется новый массив  $B$ , элементы которого равны текущему экстремуму.

3. Новый импульс регистрируется, если по отношению к предыдущему он составляет 30 % и более. Данный параметр определяет чувствительность алгоритма и может быть изменен.

4. Для повышения адекватности определения волновой структуры рынка необходимо предусмотреть, чтобы каждая последующая волна была по направлению противоположна предыдущей. Это реализуется специально введенным флагом.

5. Каждая волна, построенная на основании массива  $B$  и имеющая на своем протяжении меньший по модулю заданного параметра с пересечением нулевой линии перепад значений индикатора АО, объявляется первой, а две следующие правее – второй и третьей.

Применение данного алгоритма позволяет автоматизировать процесс анализа волновой структуры рынка с целью выделения наиболее предпочтительных точек заключения сделок.

Таким образом, проведенный анализ позволил выделить шесть наиболее предпочтительных точек входа в рынок с учетом волновой структуры. При этом наиболее предпочтительными представляются точки, расположенные на третьей волне.



Рис. 2. Пример использования индикатора АО для идентификации первой волны

Разработанный инструментарий изображен на рис. 3.



Рис. 3. Технологическая цепочка интеллектуальной поддержки принятия решений на рынке Форекс

Для демонстрации результативности предложенного инструмента приведен график доходности (рис. 4) с начала 2014 г. по валютной паре «Английский фунт – доллар США» (четырёхчасовой период). Из графика видно, что за 12 совершенных сделок торговый советник увеличил начальный депозит с 10 000 до 11 281 долл. США.



Рис. 4. График доходности начиная с 2014 г.

### Заключение

В статье предложены два алгоритма формирования торговых сигналов. Результатом работы первого являются атрибутивные сигналы трех видов: покупка, продажа, вне рынка. Модифицированный второй алгоритм позволяет рассчитать ожидаемое изменение цены с указанием количества пунктов в сторону роста либо убыли цены.

Выделены шесть технических индикаторов (Alligator, Bands, Envelopes, Ichimoku, SAR и MA140-MA120), значения которых статистически значимо (величина ошибки  $p < 0,001$ ) связаны с торговыми сигналами.

Предложена технология создания и использования нейронечеткой системы для поддержки принятия решений на валютном рынке. При этом точность разработанной модели превосходит точность линейной и квадратичной регрессий.

Выделены шесть наиболее предпочтительных точек входа в рынок с учетом волновой структуры. При этом наиболее подходящими представляются точки, расположенные на третьей волне.

Разработан алгоритм определения волновой структуры валютного рынка, отличающийся использованием для определения первой волны технического индикатора АО.

Предложен метод уменьшения количества ложных сигналов механических торговых систем, который применяет алгоритм идентификации валютного рынка, позволяющий достичь соотношения количества прибыльных сделок к убыточным на уровне восемь к двум.

### Список литературы

1. Элдер, А. Как играть и выигрывать на бирже / А. Элдер. – М. : Диаграмма, 2001. – 352 с.
2. Демарк, Т.Р. Технический анализ – новая наука / Т.Р. Демарк. – М. : Диаграмма, 1999. – 288 с.
3. Куликов, А.А. Форекс для начинающих / А.А. Куликов. – СПб. : Питер, 2006. – 384 с.
4. Акелис, С.Б. Технический анализ от «А» до «Я» / С.Б. Акелис. – М. : Диаграмма, 1999. – 234 с.
5. Половицкий, С. Логика движения валютных пар / С. Половицкий. – СПб. : Питер, 2014. – 304 с.
6. Ефремов, В.А. Финансовый инжиниринг на рынке опционов / В.А. Ефремов, А.А. Мицель // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314, № 6. – С. 47–49.
7. Белобровый, П.В. Новые грани теории принятия управленческих решений на основе применения методов причинно-следственной теории / П.В. Белобровый // Экономический вестник Ростовского государственного университета. – 2011. – № 1. – Т. 9 (ч. 3). – С. 85–87.

8. Журавлева, Ю.Н. Математическое моделирование рыночного риска / Ю.Н. Журавлева, В.С. Микшина // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2012. – № 2. – С. 118–123.

Поступила 11.07.2014

*Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники,  
Минск, ул. П. Бровки, 6  
e-mail: 6774338@tut.by*

**V.A. Rybak, H.M. Sulaiman**

### **INTELLIGENT DECISION SUPPORT ON FOREX**

A new technology of intelligent decision support on Forex, including forming algorithms of trading signals, rules for the training sample based on technical indicators, which have the highest correlation with the price, the method of reducing the number of losing trades, is proposed. The last is based on an analysis of the wave structure of the market, while the beginning of the cycle (the wave number one) is offered to be identified using Bill Williams Oscillator (Awesome oscillator). The process chain of constructing neuro-fuzzy model using software package MatLab is described.

*ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ, ИЗОБРАЖЕНИЙ  
И РАСПОЗНАВАНИЕ ОБРАЗОВ*

УДК 621.396.98

А.Н. Сидоревич, И.Н. Давыденко

**СИНТЕЗ И ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПЕНСАТОРА  
АКТИВНЫХ ШУМОВЫХ ПОМЕХ С ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКИМ  
КОРРЕКТОРОМ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК**

*Приводятся результаты синтеза и имитационного моделирования двухпараметрического корректора частотных характеристик компенсатора активных шумовых помех для случая, когда частотные характеристики каналов приема описываются частотной характеристикой колебательного звена. Синтез структуры корректора выполняется на основе представления частотных характеристик каналов приема в виде двухполосной модели. Сравнение эффективностей предложенного двухпараметрического корректора частотных характеристик и однопараметрического корректора, основанного на узкополосном приближении частотной характеристики колебательного звена, производится методом имитационного моделирования. Показывается, что однопараметрический корректор частотных характеристик проигрывает по потенциальной эффективности двухпараметрическому корректору.*

**Введение**

Пространственная фильтрация полезного сигнала с помощью адаптивных приемных систем является одним из основных методов решения задач обнаружения и измерения координат цели при воздействии на радиолокационную систему активных шумовых помех.

Компенсация помех осуществляется за счет выравнивания сигналов в основном и компенсационном каналах по амплитуде и фазе с их последующим межканальным вычитанием [1]. Эффективность компенсации ограничивается неидентичностью частотных характеристик каналов приема. Для повышения эффективности компенсации целесообразно использовать малопараметрические корректоры частотных характеристик [1, 2].

**1. Синтез структуры двухпараметрического корректора частотных характеристик**

Будем полагать, что частотные характеристики каналов приема одноканального компенсатора активной шумовой помехи описываются частотными характеристиками колебательного звена [3]:

$$K_o(j\omega) = \frac{1}{[j\omega]^2 + 2 \cdot \alpha_o \cdot [j\omega] + \omega_{po}^2}; \quad (1)$$

$$K_k(j\omega) = \frac{1}{[j\omega]^2 + 2 \cdot \alpha_k \cdot [j\omega] + \omega_{pk}^2}, \quad (2)$$

где  $K_o(j\omega)$ ,  $K_k(j\omega)$  – частотные характеристики основного и компенсационного каналов приема соответственно;

$\alpha_o, \omega_{po}$  – параметры колебательного звена основного канала приема;

$\alpha_k, \omega_{pk}$  – параметры колебательного звена компенсационного канала приема.

Учитывая, что корни алгебраического уравнения  $p^2 + 2 \cdot \alpha \cdot p + \omega_p^2 = 0$  описываются выражением  $p_{1,2} = -\alpha \pm j\sqrt{\omega_p^2 - \alpha^2}$ , можно получить следующее чисто полюсное представление частотных характеристик колебательных звеньев, имеющее два полюса:

$$K_o(j\omega) = \frac{T_0^2}{[1 + j(\omega - \omega_0) \cdot T_0] \cdot [1 + j(\omega + \omega_0) \cdot T_0]}; \quad (3)$$

$$K_k(j\omega) = \frac{(T_0 + \delta T)^2}{[1 + j(\omega - \omega_0 - \delta\omega) \cdot (T_0 + \delta T)] \cdot [1 + j(\omega + \omega_0 + \delta\omega) \cdot (T_0 + \delta T)]}, \quad (4)$$

где  $\omega_0 = \sqrt{\omega_{p0}^2 - \alpha_o^2}$  – центральная частота колебательного звена основного канала приема;

$T_0 = \frac{1}{\alpha_o}$  – постоянная времени колебательного звена основного канала приема;

$\omega_0 + \delta\omega = \sqrt{\omega_{pk}^2 - \alpha_k^2}$  – центральная частота колебательного звена компенсационного канала приема;

$T_0 + \delta T = \frac{1}{\alpha_k}$  – постоянная времени колебательного звена компенсационного канала;

$\delta\omega_0$  и  $\delta T_0$  – рассогласование центральных частот и постоянных времени колебательного звена основного и компенсационного каналов соответственно.

В соответствии с [1] структурная схема двухпараметрического корректора частотных характеристик, соответствующего частотным характеристикам основного и компенсационного каналов приема (3) и (4), показана на рис. 1, где  $K_{кф1}(j\omega)$  и  $K_{кф2}(j\omega)$  – частотные характеристики корректирующих фильтров.

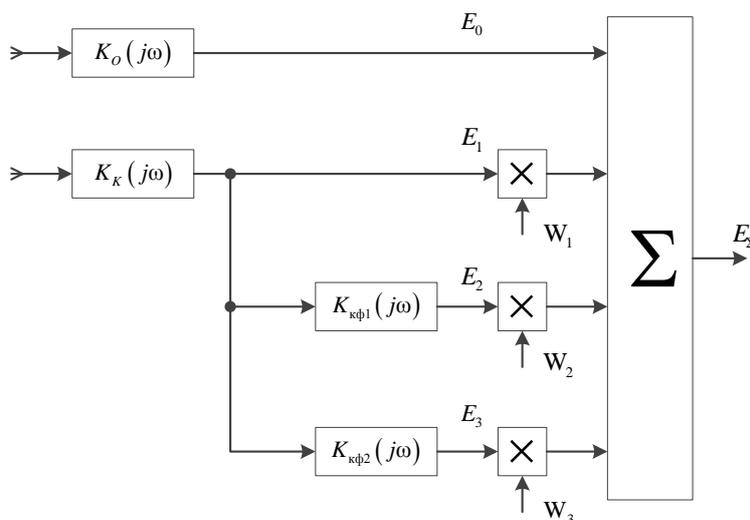


Рис. 1. Структурная схема двухпараметрического корректора частотных характеристик

Как показано в [1], для полной коррекции двухполосной частотной характеристики компенсационного канала (4) частотные характеристики корректирующих фильтров должны соответствовать частотной характеристике основного канала (3). Они описываются следующими выражениями:

$$K_{кф1}(j\omega) = \frac{1}{1 + j(\omega - \omega_0) \cdot T_0}; \quad (5)$$

$$K_{кф2}(j\omega) = \frac{1}{1 + j(\omega + \omega_0) \cdot T_0}. \quad (6)$$

Комплексные весовые коэффициенты корректора  $W_1, W_2, W_3$  должны выбираться таким образом, чтобы обеспечить минимум мощности подавляемой помехи на выходе автокомпенсатора шумовой помехи:

$$2\sigma_{\Sigma}^2 = |E_{\Sigma}(t)|^2 = |E_0(t) + \mathbf{W}^T \mathbf{E}(t)|^2, \quad (7)$$

где  $E_0$  – комплексная амплитуда сигнала основного канала;

$\mathbf{W} = \{W_1, W_2, W_3, \dots, W_N\}^T$  – вектор-столбец комплексных весовых коэффициентов;

$\mathbf{E} = \{E_1, E_2, E_3, \dots, E_N\}^T$  – вектор-столбец комплексных амплитуд сигналов на входах комплексных весовых умножителей.

Частотную характеристику корректора с учетом выражений (5) и (6) можно представить в следующем виде:

$$W_1 + \frac{W_2}{1 + j(\omega - \omega_0) \cdot T_0} + \frac{W_3}{1 + j(\omega + \omega_0) \cdot T_0} = W_1 + \frac{W_2 + W_3 + j\omega_0 T_0 \cdot (W_2 - W_3) + (W_2 + W_3) \cdot j\omega T_0}{[1 + j(\omega - \omega_0) \cdot T_0] \cdot [1 + j(\omega + \omega_0) \cdot T_0]}.$$

С точностью до несущественных постоянных множителей запишем следующие альтернативные частотные характеристики корректирующих фильтров:

$$K_{\text{кф1}}(j\omega) = \frac{1}{[1 + j(\omega - \omega_0) \cdot T_0] \cdot [1 + j(\omega + \omega_0) \cdot T_0]}; \quad (8)$$

$$K_{\text{кф2}}(j\omega) = \frac{j\omega T_0}{[1 + j(\omega - \omega_0) \cdot T_0] \cdot [1 + j(\omega + \omega_0) \cdot T_0]} = K_{\text{кф1}}(j\omega) \cdot j\omega T_0. \quad (9)$$

Выражение (8) соответствует частотной характеристике основного канала, выражение (9) – последовательному соединению корректирующего фильтра  $K_{\text{кф1}}(j\omega)$  и идеального дифференцирующего фильтра  $j\omega T_0$ .

В узкополосном приближении используют следующее однополюсное выражение для частотных характеристик колебательных звеньев, учитывающее слабое изменение второго множителя знаменателя частотных характеристик (3) и (4) в области резонанса  $\omega \approx \omega_0$ :

$$K_0(j\omega) \approx \frac{1}{j \cdot 2\omega_0} \cdot \frac{T_0}{[1 + j(\omega - \omega_0) \cdot T_0]};$$

$$K_{\kappa}(j\omega) \approx \frac{1}{j \cdot 2 \cdot (\omega_0 + \delta\omega)} \cdot \frac{(T_0 + \delta T)}{[1 + j(\omega - \omega_0 - \delta\omega) \cdot (T_0 + \delta T)]}.$$

При таком приближении для коррекции неидентичностей одноканального компенсатора достаточно одного корректирующего фильтра с частотной характеристикой, соответствующей частотной характеристике основного канала [1].

## 2. Синтез следящих алгоритмов работы двухпараметрического корректора частотных характеристик

Синтез следящих алгоритмов формирования весовых коэффициентов заключается в синтезе дискриминатора сигналов ошибок и в синтезе цепей сглаживания сигналов ошибок [2]. Сигналы ошибок формируются в виде производных критерия качества по измеряемым весовым

коэффициентам [2]. С учетом выбора критерия качества в виде минимума выходной мощности помехи вектор сигналов ошибок запишется следующим образом [2]:

$$U_{co} = -\frac{\partial |E_0(t) + \mathbf{E}^T(t) \cdot \mathbf{W}|^2}{\partial \mathbf{W}} = -2\mathbf{E}^*(t) \cdot \{E_0(t) + \mathbf{E}^T(t) \cdot \mathbf{W}\}. \quad (10)$$

Для градиентных алгоритмов формирования весовых коэффициентов цепи сглаживания выбираются в виде идеальных интеграторов в предположении неизменности задающих воздействий [2]. В этом случае система дифференциальных уравнений, которая описывает работу автокомпенсатора шумовой помехи с корректором частотных характеристик, реализующего критерий минимума выходной мощности помехи, имеет вид

$$\frac{1}{K_v} \cdot \frac{d\mathbf{W}}{dt} = U_{co} = -2\mathbf{E}^*(t) \cdot \{E_0(t) + \mathbf{E}^T(t) \cdot \mathbf{W}\}, \quad (11)$$

где  $K_v$  – коэффициент преобразования интегратора по скорости.

Структурная схема двухпараметрического корректора частотных характеристик, соответствующая градиентному способу формирования весовых коэффициентов, показана на рис. 2.

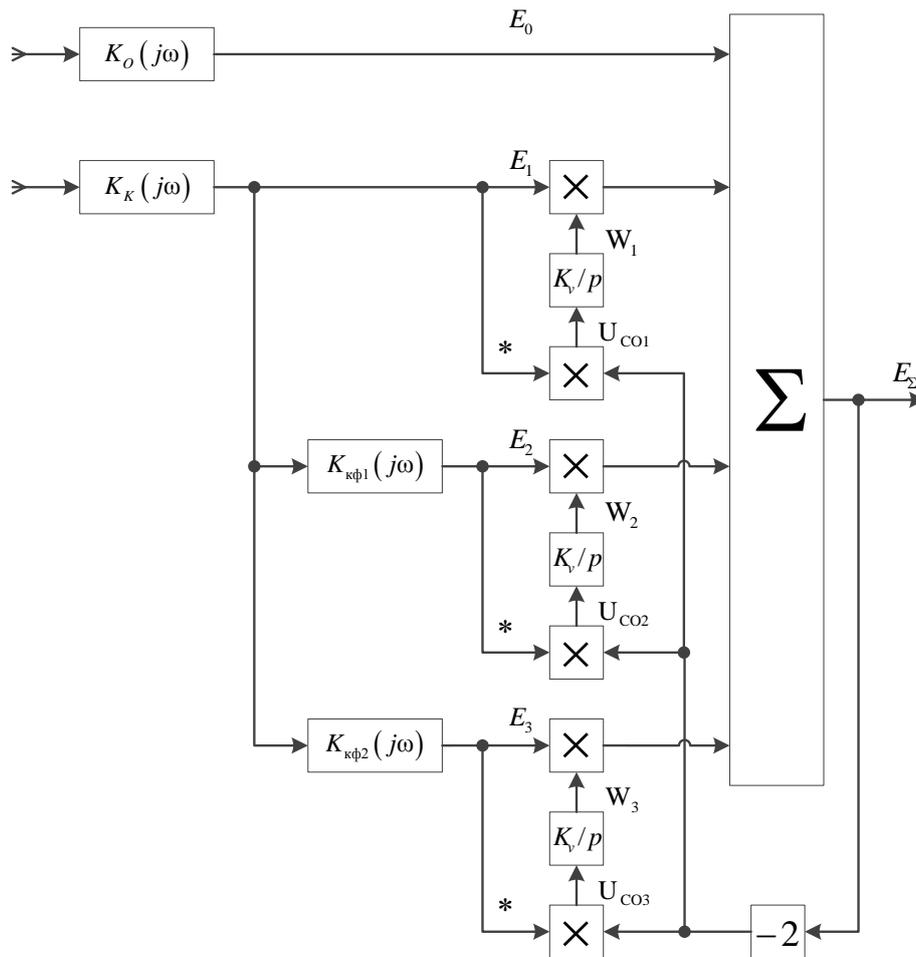


Рис. 2. Структурная схема корректора частотных характеристик с градиентным формированием весовых коэффициентов

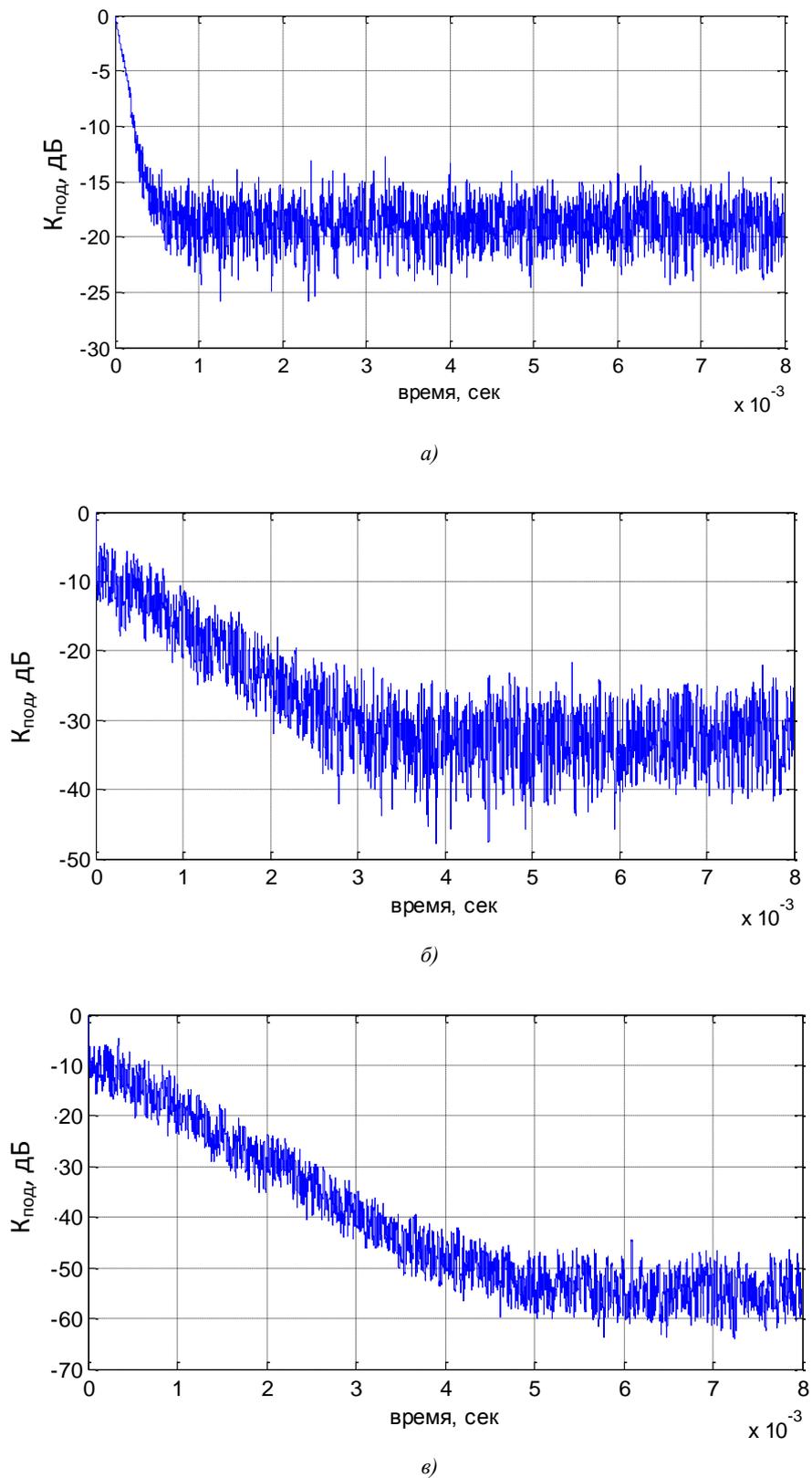


Рис. 3. Переходной процесс выходной мощности автокомпенсатора шумовой помехи: а) при отсутствии коррекции частотных характеристик; б) при однопараметрической коррекции частотных характеристик; в) при двухпараметрической коррекции частотных характеристик

При переходе к дискретному времени  $\frac{dW}{dt} \approx \frac{W(i) - W(i-1)}{\Delta t}$ , где  $\Delta t$  – интервал дискретизации,  $i$  – номер временного отсчета, получим дискретный вариант градиентного алгоритма формирования весовых коэффициентов:

$$\frac{1}{K_v} \cdot \frac{W(i) - W(i-1)}{\Delta t} = -2E^*(i-1) \cdot E_{\Sigma}(i-1)$$

или

$$W(i) = W(i-1) - 2K_v \cdot \Delta t \cdot E^*(i-1) \cdot E_{\Sigma}(i-1). \quad (12)$$

### 3. Имитационное моделирование автокомпенсатора шумовой помехи с двухпараметрическим корректором частотных характеристик

Результаты имитационного моделирования автокомпенсатора шумовой помехи с двухпараметрическим корректором частотных характеристик и градиентным способом формирования весовых коэффициентов (12) показаны на рис. 3. При моделировании предполагалось, что основной приемный канал содержит резонансный контур (1) со значениями полосы пропускания  $\Delta f_{\text{осн}} = 3$  МГц и центральной частотой  $f_{\text{осн}} = 5$  МГц. Резонансный контур компенсационного канала (2) расстроен относительно основного и характеризуется значениями полосы пропускания  $\Delta f_{\text{комп}} = 2$  МГц и центральной частоты  $f_{\text{комп}} = 6$  МГц. Мощность внутренних шумов каналов задана  $-55$  дБ относительно мощности помехи в каналах. Частота дискретизации модели 50 МГц. Оценка коэффициента подавления осуществляется по отношению мощности сигнала на выходе автокомпенсатора к мощности сигнала в основном канале.

На рис. 3, а величина подавления помехи из-за неидентичностей частотных характеристик основного и компенсационного каналов не превышает 20 дБ.

При использовании однопараметрического корректора эффективность подавления повышается до 30 дБ, но все еще не достигает потенциальной (рис. 3, б).

Использование двухпараметрического корректора позволяет полностью подавить помеху до уровня внутренних шумов и получить коэффициент подавления до 55 дБ (рис. 3, в).

#### Заключение

В работе приведены алгоритмы функционирования двухпараметрического корректора частотных характеристик для компенсатора активных шумовых помех. Результаты имитационного моделирования показали работоспособность двухпараметрического корректора с градиентным способом формирования частотных характеристик. Для двухполюсной модели колебательного контура использование однопараметрического корректора недостаточно для подавления помехи, так как позволяет повысить коэффициент подавления помехи с 20 дБ только до 30 дБ, а применение двухпараметрического корректора позволяет полностью подавить помеху с коэффициентом подавления 55 дБ.

#### Список литературы

1. Сидоревич, А.Н. Синтез структуры корректора частотных характеристик компенсатора активных шумовых помех / А.Н. Сидоревич, И.Н. Давыденко // Электроника инфо. – 2012. – № 7. – С. 101–103.
2. Монзинго, Р.А. Адаптивные антенные решетки: введение в теорию / Р.А. Монзинго, Т.У. Миллер ; пер. с англ. – М. : Радио и связь, 1986. – 448 с.

3. Гоноровский, И.С. Радиотехнические цепи и сигналы : учебник для вузов / И.С. Гоноровский. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1986. – 512 с.

Поступила 13.05.2014

*ОАО «КБ Радар» – управляющая компания  
холдинга «Системы радиолокации»,  
Минск, ул. Коммунистическая, 11  
e-mail: alexsit@tut.by*

**A.N. Sidorevich, I.N. Davydenko**

**SYNTHESIS AND SIMULATION OF THE COMPENSATOR  
OF ACTIVE NOISE INTERFERENCE WITH A TWO-PARAMETER CORRECTOR  
OF FREQUENCY CHARACTERISTICS**

The article presents the results of synthesis and simulation of a two-parameter corrector of frequency characteristics of the active noise interference compensator for the case when the frequency characteristics of the reception channels are described by the frequency response of the oscillator. The synthesis of the structure of corrector is based on presenting the frequency characteristics of the receiving channels as a bipolar model. Comparison of the effectiveness of the proposed two-parameter corrector frequency characteristics and the one-parameter corrector based on narrow-band approximation of the frequency response of the oscillator is performed by simulation. It is shown that the potential effectiveness of a one-parameter equalizer of frequency characteristics is less than potential effectiveness of a two-parameter corrector.

УДК 004

Э.Н. Середин, Б.А. Залесский

## АЛГОРИТМ ИНТЕРАКТИВНОГО ВЫДЕЛЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТОВ НА АЭРОФОТОСНИМКАХ И КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

*Рассматривается новый подход к решению задачи выделения линейных объектов на аэрофотоснимках и космических изображениях. Предлагается алгоритм интерактивного выделения линейных объектов с помощью ломаных линий, разработанный на основе описанного подхода. Преимуществами алгоритма являются возможность его быстрого выполнения, легкая настройка для практической работы, возможность удобной ручной корректировки решения. Алгоритм обеспечивает высокую точность выделения объектов на космических снимках среднего и низкого разрешения. Описываются особенности последовательных и параллельных вычислительных и программных реализаций алгоритма. Разработанные подходы к реализации предложенного алгоритма позволили уменьшить на несколько порядков объем требуемых вычислений, а также сократить время его выполнения практически до долей секунды. Приводятся оценки быстродействия версий алгоритма, оптимизированных для выполнения на видеокarte.*

### Введение

В последние годы все большую значимость приобретает актуальная картографическая информация. Карты местности повсеместно используются в строительстве, навигации, сельском хозяйстве, при чрезвычайных ситуациях и т. д. Наиболее востребованными являются карты местности, построенные на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В зависимости от решаемых задач используются снимки низкого, среднего или высокого разрешения. Однако для получения нужной информации в дополнение к широким возможностям выбора и получения ДЗЗ необходимо наличие быстрых, надежных методов и алгоритмов дешифрирования.

При решении упомянутых и многих других прикладных задач используются снимки среднего или низкого пространственного разрешения с большим количеством спектральных каналов, которые были получены, например, со спутников Landsat 5, 7, 8 и др. [1]. Задачи сегментации и дешифрирования таких спектральных снимков трудны: для их решения требуется большой объем работы, выполняемой специалистами вручную [2]. Трудность здесь вызвана невысоким пространственным разрешением снимков; например, для спутников Landsat 7 и 8 оно равно 30 м на пиксел для спектральных каналов и 15 м на пиксел для панхроматического канала. Разработка алгоритмов выделения объектов различного типа на таких изображениях до сих пор является актуальной задачей.

К сожалению, алгоритмы автоматической сегментации не отличаются высокой точностью и надежностью, поэтому интерактивные методы с различной долей автоматизации [3–12] по-прежнему остаются более предпочтительными для выполнения практического дешифрирования аэрофотоснимков и космических изображений среднего и низкого разрешения.

В процессе векторизации космических снимков значительные усилия затрачиваются на выделение линейных объектов: дорог, рек, а также границ объектов. При этом независимо от того, является линейный объект асфальтной или проселочной дорогой, или тропинкой, или малой рекой, для снимков среднего и низкого пространственного разрешения его ширина обычно равна одному или нескольким пикселям. Это часто делает невозможным выполнение задачи векторизации снимка в автоматическом режиме и существенно затрудняет ее решение в интерактивном.

В настоящей работе предлагается алгоритм интерактивного выделения линейных объектов на аэрофотоснимках и космических изображениях среднего и низкого пространственного разрешения с помощью ломаных линий. Преимуществами предложенного алгоритма является возможность его быстрого выполнения в течение долей секунды, легкая настройка для практической работы, возможность удобной ручной корректировки решения. Интерактивная часть алгоритма заключается в задании экспертом на изображении начальной и конечной точек вы-



ближен ломаной линией; число звеньев ломаной  $n$ ; число точек на каждой направляющей  $d$ ; максимально разрешенный угол излома ломаной  $\gamma$ , ограничивающий допустимую кривизну решения.

*Шаг 2.* Строится отрезок прямой с концами  $a$  и  $b$ , который разбивается на заранее заданное пользователем количество одинаковых отрезков. Координаты пикселей разбиения заносятся в массив.

*Шаг 3.* Выбирается один из известных операторов для построения градиента исходного изображения, например оператор Превитт, Собеля и т. д., или желаемый оператор задается пользователем интерактивно в зависимости от характеристик обрабатываемого изображения.

*Шаг 4.* Вычисляется градиент исходного изображения, который сохраняется в отдельном массиве.

*Шаг 5.* Для пикселей  $a = p_0, p_1, \dots, p_n = b$  (сохраненных в массиве), разбивающих отрезок  $[a, b]$  на равные интервалы, строятся направляющие ломаных – отрезки прямых линий заданной длины, перпендикулярные  $[a, b]$  и проходящие через  $p_j, j = 1, \dots, n-1$ . Каждая направляющая разбивается на равные интервалы, число которых задается пользователем. Имеет смысл разбивать направляющие так, чтобы длина интервалов была больше одного пикселя.

*Шаг 6.* Рассматриваются всевозможные растровые ломаные с началом в пикселе  $a$ , концом в пикселе  $b$  и узлами в концах интервалов разбиения направляющих. Для каждой растровой ломаной вычисляется и сохраняется сумма  $S$  модулей синусов углов между градиентом изображения и отрезком ломаной.

*Шаг 7.* Находится максимальная сумма  $S_{\max}$  из всех сумм, вычисленных на шаге 6 при полном переборе всех ломаных с учетом задаваемого пользователем максимального допустимого угла  $\gamma$  между отрезками двух соседних направляющих. Запоминаются также координаты узлов этой ломаной.

*Шаг 8.* Записываются в массив координаты узлов найденной ломаной с  $S = S_{\max}$ .

*Шаг 9.* Найденная ломаная линия, которая принимается за приближение участка линейного объекта, отображается на фоне исходного изображения.

*Шаг 10.* В случае необходимости пользователь может скорректировать форму ломаной в интерактивном режиме путем перетаскивания одного или нескольких ее узлов.

*Шаг 11.* Полученное решение принимается или отменяется пользователем. Если результат принят, его можно сохранить в файл и продолжить работу алгоритма. В случае продолжения пиксел  $b$  становится начальным для нового участка линейного объекта, т. е. полагается  $a = b$ . Далее выбирается новый пиксел  $b$  (конец нового участка) и повторяются шаги 1–10.

## 2. Оценка быстродействия последовательной реализации алгоритма

При дешифрировании изображений программная реализация алгоритма запускается многократно, поэтому одним из основных требований к ней является возможность выполнения алгоритма в режиме реального времени либо не более чем с односекундной задержкой.

Тестирование неоптимизированной версии алгоритма, основанной на полном переборе всех ломаных, показало, что большая часть времени вычисления приходится на выбор наилучшей ломаной из всех построенных (рис. 2). Оно очень велико для практической реализации алгоритма.

Количество операций  $N$  при полном переборе всех вариантов зависит от числа всех возможных ломаных. Очевидно, что если  $d$  – число точек на каждой направляющей,  $n$  – их количество, то  $N = O(d^n)$ . Например, время вычисления оптимальной ломаной с 7 узлами и 64 точками на каждой направляющей методом полного перебора на CPU Core2Quad Q6600 равно 77,6 с.

Не слишком большой эффект дает распараллеливание алгоритма в чистом виде для выполнения на двух-четырёх ядрах процессора. При этом не остается свободных ресурсов процессора для выполнения других задач.

Для ускорения расчетов необходимо было, во-первых, переработать алгоритм, уменьшив количество операций, необходимых для поиска оптимального решения, и, во-вторых, макси-

мально распараллелить его программную реализацию, задействовав видеокарту, которая обеспечивает одновременное выполнение огромного числа операций.

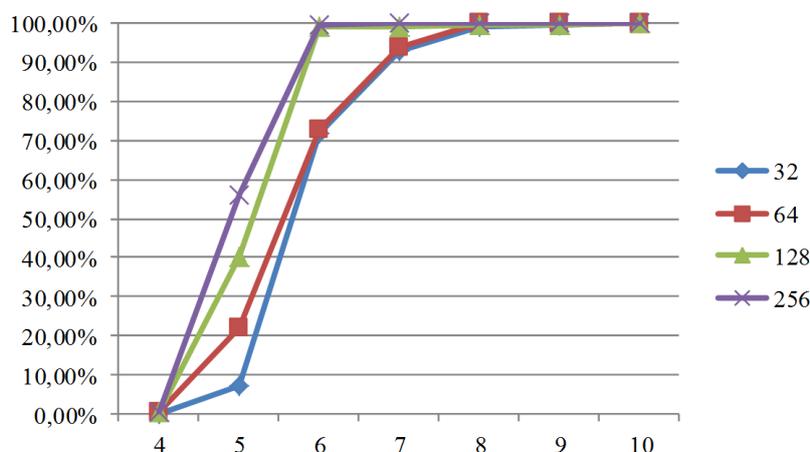


Рис. 2. Доля времени поиска оптимальной ломаной среди всех допустимых, в процентах от общего времени работы алгоритма. По оси X отложено число узлов ломаной. Кривые соответствуют 32, 64, 128, 256 узлам на каждой направляющей

Если не учитывать ограничение на кривизну ломаной, методы динамического программирования (ДП) позволяют найти наилучшее приближение за  $N = O(d^2(n-1) + d)$  операций, где, как и ранее,  $d$  – число точек на каждой направляющей,  $n$  – количество направляющих. Однако для выделения линейных объектов с помощью ломаных предпочтительно использовать ограничение на их кривизну, так как это позволяет значительно повысить точность выделения на изображениях невысокого разрешения и при наличии шумов и искажений. Специально для такого случая была разработана версия метода динамического программирования, позволяющая находить приближения ломаными заданной кривизны за  $N = O(d^3(n-2) + d^2)$  операций.

Для дальнейшего ускорения вычислений были разработаны параллельные реализации ДП-версий алгоритма с использованием технологии программирования CUDA.

### 3. Общее описание параллельного алгоритма поиска наилучшего решения

Параллельная версия алгоритма специально разработана для большого количества одновременно работающих потоков с учетом трех основных требований: сократить время выполнения и общее количество операций, а также уменьшить объем памяти, используемой на промежуточных шагах работы алгоритма. Ее особенность заключается в возможности параллельного выполнения шагов алгоритма. Эффективное распараллеливание алгоритма возможно в случае, когда функция-критерий алгоритма, на основе которой строится ломаная, приближающая линейный объект, является аддитивной функцией относительно звеньев ломаной.

Обозначим через  $\varphi(L)$  функцию-критерий – числовую характеристику ломаной  $L$ , на основе максимизации которой строится приближение (детальное описание критериев приведено в [16]). Будем использовать  $\varphi(L)$ , аддитивные относительно ее звеньев:

$$\varphi(L) = \sum_{i=1}^n \varphi(L(j_{i-1}, j_i)),$$

где  $j_0 = a$ ,  $j_n = b$  – начальная и конечная точки ломаной;

$j_i = 1, 2, \dots, d$  ( $i = 1, 2, \dots, n-1$ ) – координаты узлов ломаной относительно соответствующей направляющей (см. рис. 1), или, иными словами, номера точек на каждой направляющей;

$L(j_{i-1}, j_i)$  – отрезки ломаных, ограниченные точками  $j_{i-1}, j_i$ .

Для простоты поясним принцип работы алгоритма на примере ломаной с пятью направляющими линиями (рис. 3). Координаты внутренних звеньев ломаных относительно соответствующих направляющих будем обозначать  $i, j, k, l, m$ .

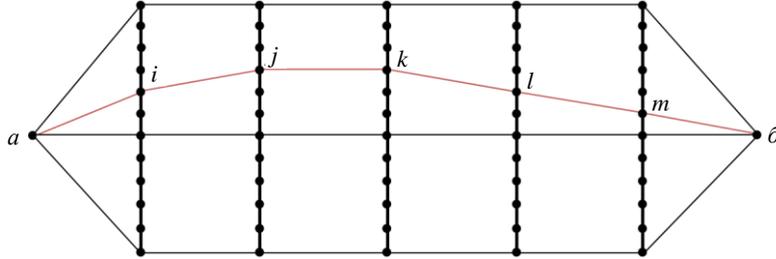


Рис. 3. Пример построения направляющих линий в точках изгиба

*Шаг А.* Вычисляем и запоминаем характеристики  $\varphi(L(j_{i-1}, j_i))$  всех возможных отрезков ломаных.

*Шаг Б.* Вычисляем характеристики  $\varphi = \varphi(L(i, j, k))$  всех трехзвенных ломаных допустимой кривизны  $L(i, j, k)$ , выходящих из точки  $a$  и проходящих через точки  $i, j$  в каждую точку  $k$  третьей направляющей линии. Для каждой пары индексов  $j, k$  второй и третьей ломаных находим и сохраняем значения функционала  $\varphi(L(i, j, k))$  на локально оптимальных трехзвенных ломаных, проходящих через точки  $j, k$ , и номер точки на первой направляющей для оптимальной ломаной:

$$\varphi_{j,k}(1) = \max_i^* \{ \varphi(L(i, j, k)) \} \text{ и } \tilde{i}_{j,k}(1) = \arg \max_i^* \{ \varphi(L(i, j, k)) \}. \quad (1)$$

Символ  $*$  в формуле (1) обозначает, что максимум берется только по трехзвенным ломаным с допустимой кривизной, иначе говоря, таким, у которых соседние отрезки образуют между собой угол, меньший наперед заданного угла  $\gamma$ .

*Шаг В.* Вычисляем и запоминаем значения функционала  $\varphi(L(i, j, k, l))$  на локально оптимальных четырехзвенных ломаных, проходящих через точки  $k, l$ :

$$\varphi_{k,l}(2) = \max_{i,j}^* \{ \varphi(L(i, j, k, l)) \} = \max_j^* \{ \varphi_{j,k}(1) + \varphi(L(k, l)) \}$$

и значения координат

$$\tilde{i}_{k,l}(2), \tilde{j}_{k,l}(2) = \arg \max_{i,j}^* \{ \varphi(L(i, j, k, l)) \}.$$

*Шаг Г.* Повторяем вычисления для пятизвенных ломаных  $L(i, j, k, l, m)$ :

$$\varphi_{l,m}(3) = \max_{i,j,k}^* \{ \varphi(L(i, j, k, l, m)) \} = \max_k^* \{ \varphi_{k,l}(2) + \varphi(L(l, m)) \}$$

и

$$\tilde{i}_{l,m}(3), \tilde{j}_{l,m}(3), \tilde{k}_{l,m}(3) = \arg \max_{i,j,k}^* \{ \varphi(L(i, j, k, l, m)) \}.$$

*Шаг Д.* Аналогично предыдущим вычислениям находим

$$\varphi_m(4) = \max_{i,j,k,l}^* \{ \varphi(L(i, j, k, l, m, b)) \} = \max_l^* \{ \varphi_{l,m}(3) + \varphi(L(m, b)) \}$$

и

$$\tilde{i}_m(4), \tilde{j}_m(4), \tilde{k}_m(4), \tilde{l}_m(4) = \arg \max_{i,j,k,l}^* \{ \varphi(L(i, j, k, l, m, B)) \}.$$

*Шаг Е.* Вычисляем максимум по  $m$  среди чисел  $\varphi_m(4)$  и соответствующие значения узлов, находим координаты  $\tilde{i}(5)$ ,  $\tilde{j}(5)$ ,  $\tilde{k}(5)$ ,  $\tilde{l}(5)$ ,  $\tilde{m}(5)$  звеньев оптимальной ломаной.

*Шаг Ж.* Конец.

Данная версия алгоритма допускает быстрое параллельное выполнение на современных бюджетных видеокартах, таких, например, как GeForce GTX 650 Ti.

Параллельная версия алгоритма, по сути, заключается в выполнении шагов 1–5 последовательного алгоритма, шагов А–Е параллельной версии вычисления максимума функционального критерия и затем шагов 8–11 последовательной версии.

#### 4. Результаты тестирования алгоритма и его параллельной реализации

Тестирование показало достаточно высокую точность построенного алгоритма (рис. 4).

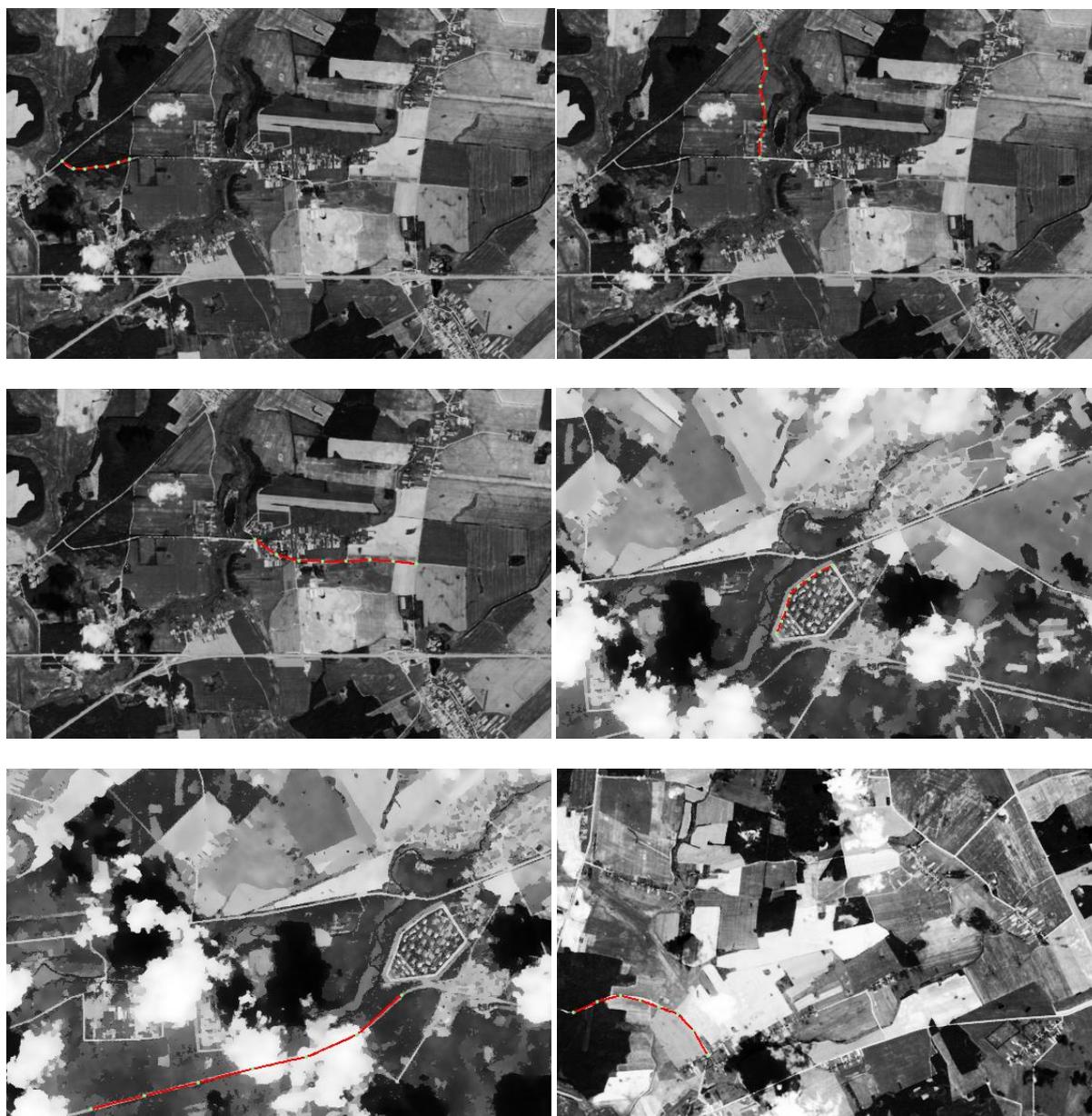


Рис. 4. Примеры работы алгоритма

На космических снимках, полученных со спутника Landsat 8, алгоритм выделяет более 95 % участков линейных объектов. После его настройки на конкретные снимки выделяются остальные 5 %.

Параллельная версия алгоритма реализована с использованием технологии программирования CUDA. Полученные данные тестирования (таблица) показывают, что CUDA-версия параллельного алгоритма выполняет расчеты за приемлемое время (доли секунды) в широком диапазоне значений входных параметров. При этом время расчетов не сильно изменяется при увеличении количества операций.

Время выполнения на GPU GeForce GTX 650Ti параллельной версии функции поиска наилучшего решения без ограничения угла между соседними ломаными линиями для 32, 64, 128, 256 точек на направляющих, мс

Количество интервалов разбиения $m$	Количество точек на направляющих линиях $d$			
	32	64	128	256
5	203	218	234	249
6	218	234	249	265
7	234	234	249	265
8	234	234	265	297

### Заключение

В работе предложен алгоритм интерактивного выделения линейных объектов на аэрофотоснимках и космических изображениях среднего и низкого пространственного разрешения. Его интерактивная часть заключается в выделении экспертом начального и конечного пикселей участка линейного объекта, намеченного для выделения. Далее алгоритм автоматически строит непрерывную ломаную линию наперед заданной кривизны с концами в определенных экспертом пикселях, которая приближает выделенный участок. После окончания работы алгоритма эксперт может скорректировать построенную ломаную, перемещая ее узлы мышкой.

Преимуществами предложенного алгоритма является возможность его быстрого выполнения в течение долей секунды, легкая настройка для практической работы, возможность удобной ручной корректировки решения.

В статье приведены оценки быстродействия последовательной реализации алгоритма. Реализация алгоритма интерактивного выделения линейных объектов на аэрофотоснимках и космических изображениях среднего и низкого пространственного разрешения основана на разработанной версии метода динамического программирования и позволяет проводить вычисления в параллельном режиме. Разработанные подходы к реализациям предложенного алгоритма позволяют уменьшить на несколько порядков объем требуемых вычислений и сократить время его выполнения. Также даны оценки быстродействия разработанной параллельной версии алгоритма. Описаны результаты, полученные при практической реализации данного алгоритма для процессора и с использованием технологии программирования видеокарт CUDA.

### Список литературы

1. LandsatLook Viewer [Электронный ресурс]. – Mode of access : <http://landsatlook.usgs.gov>. – Date of access : 28.09.2014.
2. Кочуб, Е.В. Анализ методов обработки материалов дистанционного зондирования Земли / Е.В. Кочуб, А.А. Топаз // Вестник ПГУ. Сер. Ф. – 2012. – № 16. – С. 132–140.
3. Supreet, S. Automatic Road Detection of Satellite Images – A Survey / S. Supreet, B. Seema // Intern. J. of Computer Applications & Information Technology. – 2013. – Vol. 3(2). – P. 32–34.
4. Kalaivanan, R. Survey on Road Extraction From High Resolution Satellite Images / R. Kalaivanan, S. Mishmala // Intern. J. of Advanced Research in Computer and Communication Engineering. – 2013. – Vol. 2(10). – P. 4156–4159.
5. A Family of Quadratic Snakes for Road Extraction / M.N. Dailey [et al.] // Lecture Notes in Computer Science. – 2007. – Vol. 4843. – P. 85–94.

6. Dal Poz, A.P. Dynamic Programming Approach For Semi-Automated Road Extraction From Medium- And High-Resolution Images / A.P. Dal Poz, G.M. do Vale // ISPRS Archives. – Vol. 34 (3/W8). – P. 87–91.
7. Urban digital map updating from satellite high resolution images using GIS data as a priori knowledge / T. Bailloeuil [et al.] // Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas, 2nd GRSS/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas. – Urban, 2003. – P. 283–287.
8. Niu, X. A semi-automatic framework for highway extraction and vehicle detection based on a geometric deformable model / X. Niu // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 2006. – Vol. 61. – P. 170–186.
9. Automatic Road Extraction from Satellite Imagery Using LEGION Networks / J. Yuan [et al.] // Proc. of Intern. Joint Conference on Neural Networks. – Atlanta, Georgia, USA, 2009. – P. 3471–3476.
10. Lacoste, C. Unsupervised line network extraction in remote sensing using a polyline process / C. Lacoste, X. Descombes, J. Zerubia // Pattern Recognition. – 2010. – Vol. 43 (4). – P. 1631–1641.
11. Color image segmentation: advances and prospects / H. Cheng [et al.] // Pattern Recognition. – 2001. – № 34. – P. 2259–2281.
12. Sniedovich, M. Dynamic programming. Foundations and principles / M. Sniedovich. – Boca Raton : CRC Press Taylor & Francis Group, 2011.
13. Handbook of Learning and Approximate Dynamic Programming / J. Si [et al.] // Wiley-IEEE Press, 2004.
14. Боресков, А.В. Основы работы с технологией CUDA / А.В. Боресков, А.А. Харламов. – М. : ДМК Пресс, 2010. – 232 с.
15. Сандерс, Дж. Технология CUDA в примерах: введение в программирование графических процессоров / Дж. Сандерс, Э. Кэндрот. – М. : ДМК Пресс, 2011. – 232 с.
16. Zalesky, B.A. Interactive extraction of roads and rivers in low resolution or noisy satellite images / B.A. Zalesky, E.N. Seredin // Proc. of 12th Intern. Conf. PRIP2014. – Minsk, 2014. – P. 329–334.

Поступила 02.06.2014

*Объединенный институт проблем  
информатики НАН Беларуси,  
Минск, Сурганова, 6  
e-mail: eduard.seredin@tut.by*

**E.N. Seredin, B.A. Zalesky**

## **INTERACTIVE ALGORITHM FOR SELECTION OF LINEAR OBJECTS ON AERIAL PHOTOGRAPHS AND SATELLITE IMAGES**

A new approach to the problem of extraction of linear objects on aerial photographs and satellite images is presented. An interactive algorithm of detection of linear objects by broken lines, based on the developed approach, is offered. The algorithm provides fast detection of linear objects, it is easy tuned and convenient for practical use. It is enough precise and reliable to process middle or low resolution aerial photographs and satellite images. Specificity of its parallel program implementation is also described. The developed parallel program implementation allowed to reduce the execution time of the algorithm by several orders. Estimates of execution time of versions of the algorithm, which are intended for video cards, are given in the article.

УДК 519.24

М.С. Абрамович<sup>1</sup>, С.В. Анищенко<sup>2</sup>, М.Н. Мицкевич<sup>1</sup>, О.И. Быданов<sup>3</sup>

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ЗАБОЛЕВАЕМОСТИ

*Рассматриваются методы и алгоритмы обнаружения и построения кластеров заболеваемости на изучаемой территории. Предлагается робастная версия пространственной сканирующей статистики для построения кластеров. Алгоритмы пространственно-временного кластерного анализа применяются для обнаружения кластеров заболеваемости карциномой щитовидной железы.*

### Введение

Во многих областях: медицине, криминологии, археологии, истории, градостроительстве, региональном планировании – исследуемые данные кроме информации об объектах исследования содержат также сведения об их географических координатах. Примером географических данных являются данные о заболеваемости. В простейшем случае такие данные представляют собой совокупность географических координат, соотнесенных с отдельными случаями заболевания. Для исследования географического распространения различных типов заболеваний широко применяются методы пространственно-временного кластерного анализа [1–8]. Эти методы предназначены для определения, является ли наблюдаемое распределение больных равномерным на изучаемой территории или же существуют некоторые кластеры населенных пунктов с повышенным уровнем заболеваемости. Результаты пространственно-временного кластерного анализа могут быть использованы для контроля, диагностики и предотвращения заболеваний, а также для выдвижения гипотез о причинах их возникновения.

Методы пространственно-временного кластерного анализа делятся на глобальные и локальные. Глобальные методы кластерного анализа позволяют определять существование кластеров заболеваемости на изучаемой территории. Недостатком ряда существующих критериев глобальной кластеризации является необходимость задания размеров гипотетических кластеров, которые на практике, как правило, неизвестны [1].

Методы локальной кластеризации позволяют определять местоположение и размер кластеров на изучаемой территории и проверять их статистическую значимость. Наиболее распространенными и эффективными методами построения локальных кластеров являются методы пространственной и пространственно-временной сканирующей статистики [2–5]. Эти методы служат универсальными инструментами кластерного анализа, позволяющими работать с разнообразными типами входных наборов данных, использовать модели заболеваемости, основанные на различных распределениях вероятностей, обнаруживать кластеры любых форм в зависимости от выбранного способа построения множества сканирующих окон.

В настоящей работе предложен критерий глобальной кластеризации, не требующий задания параметра, связанного с размером гипотетических кластеров. При наличии выбросов заболеваемости в кластерах рассмотрена робастная пространственная сканирующая статистика. Разработан также алгоритм построения сканирующих окон для формирования кластеров заболеваемости произвольной формы. Алгоритмы пространственного и пространственно-временного кластерного анализа применены для выявления кластеров заболеваемости карциномой щитовидной железы в популяции населения в возрасте до 18 лет на территории Республики Беларусь в 1989–2005 гг.

### 1. Критерии глобальной кластеризации

Определим статистическую гипотезу  $H_0$  об отсутствии кластеризации заболеваний на изучаемой территории (т. е. гипотезу о том, что заболеваемость среди исследуемой популяции

населения распределена равномерно) и альтернативную гипотезу  $H_1$  о наличии кластеров с повышенным уровнем заболеваемости.

Предположим, что вся изучаемая территория разделена на  $m$  районов. Пусть  $\xi_i, i = 1, \dots, m$ , – случайная величина, описывающая число случаев заболевания в  $i$ -м районе;  $\mu_i = E\{\xi_i\}, i = 1, \dots, m$ , – ожидаемое число случаев заболевания в  $i$ -м районе.

Будем предполагать, что случайная величина  $\xi_i$ , описывающая число случаев заболевания в  $i$ -м районе, при выполнении гипотезы  $H_0$  об отсутствии кластеризации на изучаемой территории имеет распределение Пуассона со средним  $\mu_i, i = 1, \dots, m$ :

$$H_0 = \{\xi_i \sim Pois(\mu_i), i = 1, \dots, m\}.$$

Будем также предполагать, что при выполнении гипотезы  $H_0$  случайные величины  $\xi_i, i = 1, \dots, m$ , являются независимыми.

Для каждого района известно число наблюдаемых случаев заболеваний  $c_i, i = 1, \dots, m$ , и численность населения этого района (численность группы риска)  $n_i, i = 1, \dots, m$ . Введем обозначения:  $C = \sum_{i=1}^m c_i$  – количество всех случаев заболеваний,  $N = \sum_{i=1}^m n_i$  – общая численность группы риска,  $d_{ij}$  – расстояние между центрами  $i$ -го и  $j$ -го районов.

Ожидаемое число случаев заболеваний в условиях нулевой гипотезы может определяться как произведение численности группы риска  $i$ -го района на общий уровень заболеваемости:

$$e_i = \frac{n_i}{N} C.$$

С учетом пуассоновской модели построим для каждого  $i$ -го района следующую статистику [1]:

$$z_i = \frac{c_i - e_i}{\sqrt{e_i}}. \quad (1)$$

Статистика (1) при выполнении нулевой гипотезы имеет асимптотически стандартное нормальное распределение. Тогда статистику  $z_i^2$  можно рассматривать как случайную величину, имеющую асимптотически  $\chi^2$ -распределение с одной степенью свободы.

Построим глобальную статистику для определения кластеризации в целом по всей территории:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^m \frac{(c_i - e_i)^2}{e_i}. \quad (2)$$

Эта статистика имеет асимптотически  $\chi^2$ -распределение с  $m - 1$  степенями свободы. Отсюда получаем  $\chi^2$ -критерий с решающим правилом:

$$\text{принимается гипотеза } \begin{cases} H_0, & \text{если } P > \alpha; \\ H_1, & \text{если } P \leq \alpha, \end{cases}$$

где  $P = 1 - F_{m-1}(\chi^2)$ ,  $F_{m-1}(\chi^2)$  – функция  $\chi^2$ -распределения с  $m-1$  степенями свободы;  $\alpha$  – уровень значимости.

Предложим еще один подход к построению критерия глобальной кластеризации на основе статистики (1). Для этого определим следующую статистику:

$$M = \max_i z_i^2. \quad (3)$$

Статистику  $z_i^2$  можно рассматривать как случайную величину, имеющую асимптотически  $\chi^2$ -распределение с одной степенью свободы. В этом случае статистика (3) в условиях нулевой гипотезы имеет распределение

$$F(M) = P\{M \leq x\} = P\{z_1^2 \leq x, z_2^2 \leq x, \dots, z_m^2 \leq x\} = \prod_{i=1}^m P\{z_i^2 \leq x\} = F_{\chi^2}^m(M).$$

Критерий для обнаружения глобальной кластеризации строится следующим образом:

$$\text{принимается гипотеза } \begin{cases} H_0, & \text{если } P > \alpha; \\ H_1, & \text{если } P \leq \alpha, \end{cases}$$

где  $P = 1 - F_{\chi^2}^m(M)$ ,  $F_{\chi^2}(\cdot)$ , – функция распределения  $\chi^2$  с одной степенью свободы.

В работе [6] Шварц предложил критерий, основанный на энтропии. Статистика критерия имеет вид

$$SET = \ln(C!) + \ln((N - C)!) - \sum_{i=1}^m (\ln(c_i!) + \ln((n_i - c_i)!)).$$

Нулевая гипотеза об отсутствии кластеризации для критерия Шварца отвергается при малых значениях статистики  $SET$ .

Критерии, рассмотренные выше, построены в предположении, что число наблюдаемых случаев заболевания в определенном районе не зависит от числа случаев заболевания в соседних районах. На практике это предположение не всегда выполняется. В работе [7] Уайтмур предложил критерий, который учитывает зависимость случаев заболеваемости в соседних районах. Статистика критерия имеет вид

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^m d_{ij} c_i c_j.$$

Нулевая гипотеза об отсутствии кластеризации для критерия Уайтмура, как и для критерия Шварца, отвергается при малых значениях статистики  $T$ .

Так как распределение статистик критериев Шварца и Уайтмура неизвестно, нельзя аналитически вычислить  $p$ -значения критериев для проверки нулевой гипотезы. В этом случае можно смоделировать наборы данных при выполнении условий нулевой гипотезы и вычислить  $p$ -значения критериев на основе метода Монте-Карло.

## 2. Методы построения локальных кластеров на основе сканирующей статистики

Наиболее распространенным и эффективным методом локального кластерного анализа является метод пространственной сканирующей статистики [2, 3].

Рассмотрим построение круговой пространственной сканирующей статистики, которая определяет круговое окно  $Z$  для каждого административного центра района. Для каждого

из этих центров радиус круга может увеличиваться от 0 до значения, при котором в круг попадает заданное максимальное число районов  $K$ , включаемых в кластер.

Пусть  $Z_{ik}, k=1, \dots, K$  – окно, составленное  $(k-1)$  ближайшими к району  $i$  соседями. Тогда все окна, которые должны сканироваться круговой пространственной сканирующей статистикой, включаются в множество

$$Z_1 = \{Z_{ik} \mid 1 \leq i \leq m, 1 \leq k \leq K\}.$$

Пространственная сканирующая статистика строится с помощью отношения правдоподобия и имеет следующий вид [3]:

$$S = \sup_{Z \in Z_1} \lambda(Z) = \sup_{Z \in Z_1} \left( \frac{c_Z}{\mu_Z} \right)^{c_Z} \left( \frac{C - c_Z}{C - \mu_Z} \right)^{C - c_Z} I \left( \frac{c_Z}{\mu_Z} > \frac{C - c_Z}{C - \mu_Z} \right), \quad (4)$$

где  $c_Z = \sum_{i \in Z} c_i$  и  $\mu_Z = \sum_{i \in Z} \mu_i$  – соответственно наблюдаемое и ожидаемое число случаев заболевания в окне  $Z$ ;  $I(\cdot)$  – индикаторная функция.

Выражение  $\frac{c_Z}{\mu_Z} > \frac{C - c_Z}{C - \mu_Z}$  в (4) означает, что внутри окна  $Z$  количество случаев заболевания относительно среднего больше по сравнению с областью вне окна.

При решении задачи поиска кластеров с пониженным риском заболевания знак неравенства в этом выражении необходимо поменять на противоположный.

Окно  $Z^* \in Z_1$ , на котором статистика (4) достигает максимального значения, будет являться наиболее вероятным кластером.

Гибкая сканирующая статистика в отличие от круговой сканирующей статистики определяет для каждого района окно неправильной формы  $Z$  путем объединения смежных с ним районов [4, 5]. Для каждого данного района  $i$  создается множество окон неправильной формы, состоящих из  $k$  объединенных районов, включая район  $i$  (т. е. граф с вершинами в центрах этих районов и ребрами, показывающими смежность районов, является связным графом). Чтобы исключить обнаружение кластера маловероятной формы, число объединенных районов ограничивается  $(K-1)$  ближайшими к региону  $i$  соседними районами. Отметим, что для реализации метода гибкой пространственной сканирующей статистики необходимо иметь матрицу смежности всех районов. Смежность двух районов может определяться как наличие у них хотя бы одной общей граничной точки. В случаях когда построение такой матрицы смежности затруднено, соединенными районами могут считаться такие, расстояние между центрами которых удовлетворяет определенному ограничению.

Пусть  $Z_{ik(j)}, j=1, \dots, j_{ik}$ , обозначает  $j$ -е окно, которое является объединением  $k$  соседних районов, начиная с района  $i$ , где  $j_{ik}$  – количество значений  $j$ , удовлетворяющих условию  $Z_{ik(j)} \subseteq Z_{ik}, k=1, \dots, K$ . В итоге все окна, которые должны сканироваться, будут включены в множество

$$Z_2 = \{Z_{ik(j)} \mid 1 \leq i \leq m, 1 \leq k \leq K, 1 \leq j \leq j_{ik}\}. \quad (5)$$

Для любого заданного района  $i$  круговая пространственная сканирующая статистика рассматривает  $K$  концентрических кругов, в то время как гибкая сканирующая статистика рассматривает также и все множества соединенных районов (включая единственный район  $i$ ), центры которых размещены внутри  $K$ -го наибольшего концентрического круга. Поэтому мощность множества  $Z_2$  гораздо больше мощности множества  $Z_1$ , которая не превышает  $mK$ .

При альтернативной гипотезе  $H_1$  о наличии кластеризации на изучаемой территории существует по крайней мере одно окно  $Z$ , для которого риск заболевания будет более высоким внутри окна, чем за его границами.

Метод пространственной сканирующей статистики можно модифицировать для анализа пространственно-временных данных, когда известна численность группы риска и число случаев заболевания в последовательные моменты времени. При таком подходе время является третьей координатой, а круговые окна, используемые для вычисления пространственной сканирующей статистики, заменяются цилиндрами. Основания этих цилиндров соответствуют некоторым областям, как и в пространственном случае, а высоты определяют длину потенциального кластера во времени.

Пространственно-временной кластерный анализ позволяет выявить возможные кластеры, существовавшие на исследуемой территории на протяжении определенного временного промежутка. Отметим, что формула для вычисления пространственной сканирующей статистики (4) остается такой же, но меняется множество сканирующих окон. Множество  $Z_1$  в формуле (4) заменяется следующим множеством  $Z_{ST}$  [5]:

$$Z_{ST} = \left\{ Z_{ik[a,b]} = \left| 1 \leq i \leq m, 1 \leq k \leq K; a, b = T_1, \dots, T_p, a \leq b \right. \right\},$$

где  $Z_{ik[a,b]}$  – цилиндрическое окно, включающее в себя район  $i$  и его  $(k-1)$  ближайших соседних районов для каждого момента времени  $T$  из временного промежутка  $[a, b]$ . Максимальную длину временного промежутка можно ограничить некоторым значением  $P$ ,  $1 \leq T \leq P$  (по аналогии с максимальным пространственным размером кластера  $K$ ).

В пространственном и пространственно-временном кластерном анализе процедура проверки статистической значимости построенных кластеров осуществляется методом статистического моделирования и состоит из следующих шагов:

*Шаг 1.* Вычисляется значение сканирующей статистики для наиболее вероятного кластера.

*Шаг 2.* Генерируется  $n$  выборок в условиях выполнения нулевой гипотезы.

*Шаг 3.* Для каждой выборки вычисляется значение сканирующей статистики.

*Шаг 4.* Из значений сканирующих статистик формируется вариационный ряд.

*Шаг 5.* Если значение статистики, вычисленное для наиболее вероятного кластера, находится в доле  $\alpha$  наибольших значений, нулевая гипотеза отвергается на уровне значимости  $\alpha$ .

Использование метода статистического моделирования позволяет также находить статистически значимые второстепенные кластеры, т. е. такие кластеры, значение статистики для которых не является максимальным, но нулевая гипотеза отвергается на уровне значимости  $\alpha$ . Самыми важными из вторичных кластеров являются те, которые не содержатся в наиболее вероятном кластере. Способность метода локального кластерного анализа находить несколько непересекающихся статистически значимых кластеров является его важной характеристикой.

### 3. Построение робастной версии сканирующей статистики

Если вероятностная модель заболеваемости описывает наблюдения с выбросами, то необходимо использовать робастные статистические методы для построения пространственных и пространственно-временных кластеров. Пусть  $\bar{c}_Z$  – выборочное среднее число заболеваний в окне  $Z$  и  $|Z|$  – мощность множества  $Z$ . Аналогично пусть  $\bar{C}$  – выборочное среднее число заболеваний по всем  $m$  районам. Так как  $c_Z = \bar{c}_Z |Z|$ , выражение (4) может быть записано в следующей форме:

$$S = \sup_{Z \in Z_1} \lambda(Z) = \sup_{Z \in Z_1} \left( \frac{\bar{c}_Z |Z|}{\mu_Z} \right)^{\bar{c}_Z |Z|} \left( \frac{\bar{C}m - \bar{c}_Z |Z|}{\bar{C}m - \mu_Z} \right)^{c - \bar{c}_Z |Z|} I \left( \frac{\bar{c}_Z |Z|}{\mu_Z} > \frac{\bar{C}m - \bar{c}_Z |Z|}{\bar{C}m - \mu_Z} \right). \quad (6)$$

В случае наличия выбросов статистика  $\bar{c}_Z$  является смещенной оценкой среднего значения в окне  $Z$ . Если в выражении (6) вместо среднего значения числа заболеваний  $\bar{c}_Z$  в окне  $Z$  использовать его робастную оценку  $c_R$ , получим робастную версию сканирующей статистики  $S_R$ :

$$S_R = \sup_{Z \in Z_1} \lambda(Z) = \sup_{Z \in Z_1} \left( \frac{c_R |Z|}{\mu_Z} \right)^{\bar{c}_Z |Z|} \left( \frac{\bar{C}m - c_R |Z|}{\bar{C}m - \mu_Z} \right)^{c - \bar{c}_Z |Z|} I \left( \frac{c_R |Z|}{\mu_Z} > \frac{\bar{C}m - c_R |Z|}{\bar{C}m - \mu_Z} \right). \quad (7)$$

Если данные содержат хотя бы один выброс, статистика (6) часто определяет кластер, который содержит только этот выброс. Чувствительность пространственной сканирующей статистики к наличию выбросов проанализирована в [8] для случая, когда вместо среднего используются робастные оценки Хампеля, Эндрюса, Хьюбера и винзорированное среднее [9]. Как показано в [8], сканирующая статистика (6) быстро возрастает при увеличении величины выброса.

Если целью исследования является определение кластера, протяженного в пространстве или времени, необходимо определить нижнюю границу числа наблюдений в кластере для уменьшения влияния выбросов.

#### 4. Алгоритм построения множества окон для гибкой сканирующей статистики

При поиске кластеров произвольной формы важную роль играет выбор алгоритма для построения множества областей различных форм при вычислении сканирующей статистики. Необходимо учитывать, что исследуемая территория может быть разбита на большое количество районов, поэтому такой алгоритм должен быть достаточно быстрым и эффективным. Отметим, что при этом должны существовать и ограничения на форму кластеров, чтобы избежать возможности обнаружения кластеров маловероятной формы.

Рассмотрим алгоритм построения множества окон  $Z_2$ , задаваемого выражением (5), для метода гибкой пространственной сканирующей статистики. Множество окон представляет собой совокупность соседних районов в пределах заранее определенного максимального числа районов в кластере  $K$ . Отличие предлагаемого алгоритма от алгоритма из работы [4] состоит в изменении порядка вычислений, которое дает возможность строить только связные множества районов. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению количества вычислений. Алгоритм состоит из следующих шагов:

*Шаг 1.* Строится матрица  $A = (a_{ij})$  размерности  $m \times m$ . При этом полагается  $a_{ij} = 1$ , если районы  $i$  и  $j$  являются соседними, и  $a_{ij} = 0$  в противном случае.

Множество окон  $Z_2$ , задаваемое формулой (5), полагается пустым:  $Z_2 = \{\emptyset\}$ ,  $i_0 = 0$ .

*Шаг 2.* Район  $i_0$ ,  $i_0 = 1, 2, \dots, m$ , полагается стартовым,  $i_0 := i_0 + 1$ .

Строится множество  $W_{i_0}$ , состоящее из района  $i_0$  и его  $(K-1)$  ближайших соседей:  $W_{i_0} = \{i_0, i_1, i_2, \dots, i_{K-1}\}$ .

*Шаг 3.* Строится множество  $Z = \{i_0\}$ .

*Шаг 4.* Множество  $Z$  добавляется в множество  $Z_2$ , если  $Z \notin Z_2$ .

*Шаг 5.* Каждый район  $j$ ,  $j \in W_{i_0}$ ,  $j \notin Z$ , который имеет соседний район в множестве  $Z$ , добавляется в множество  $Z$ , и для каждого такого случая рекурсивно повторяются шаги 4 и 5, если хотя бы один такой район  $j$  найден.

*Шаг 6.* Повторяются шаги 2–5 до построения искомого множества окон  $Z_2$ .

Вычислительная сложность приведенного алгоритма –  $O\{m(K-1)!\}$ .

### 5. Применение алгоритмов локальной и глобальной кластеризации для исследования распространенности карциномы щитовидной железы

Критерии глобальной кластеризации и алгоритмы пространственного и пространственно-временного кластерного анализа были применены для обнаружения кластеризации данных больных карциномой щитовидной железы в популяции населения в возрасте до 18 лет в период с 1989 по 2005 гг. в Республике Беларусь по 119 административным районам. Для каждого года и района были известны численность анализируемой популяции населения и число случаев заболевания.

Для вычисления расстояний в километрах использовались константы 98,699 км (эквивалентно 1° восточной долготы для Республики Беларусь) и 111,272 км (эквивалентно 1° северной широты).

Критерий глобальной кластеризации  $\chi^2$ ; критерий, основанный на статистике (3), и критерий Шварца были применены для определения наличия кластеров заболеваемости карциномой щитовидной железы в исследуемой популяции на территории Республики Беларусь. Уровень значимости  $\alpha$  полагался равным 0,05. В табл. 1 приведены по годам число случаев заболеваний, численность группы риска,  $p$ -значение критериев (значимые значения выделены жирным шрифтом).

Таблица 1

Наличие кластеров заболеваемости карциномой щитовидной железы на территории Республики Беларусь

Год	Число случаев заболеваний	Численность населения	$p$ -значение критерия $\chi^2$	$p$ -значение критерия, основанного на статистике (3)	$p$ -значение критерия Шварца
1989	1	2 905 220	1,000 000	0,073 63	0,551 576
1990	20	2 874 905	<b>0,003 111</b>	<b>0,000 036</b>	0,372 334
1991	62	2 844 490	<b>0,000 000</b>	<b>0,000 000</b>	<b>0,000 250</b>
1992	68	2 814 088	<b>0,000 000</b>	<b>0,000 000</b>	<b>0,008 230</b>
1993	98	2 783 724	<b>0,000 000</b>	<b>0,000 000</b>	<b>0,000 000</b>
1994	102	2 753 247	<b>0,000 000</b>	<b>0,000 000</b>	<b>0,000 000</b>
1995	103	2 722 849	<b>0,000 000</b>	<b>0,000 000</b>	<b>0,000 000</b>
1996	99	2 692 426	<b>0,000 000</b>	<b>0,000 000</b>	<b>0,000 000</b>
1997	87	2 661 963	<b>0,000 000</b>	<b>0,000 000</b>	<b>0,000 010</b>
1998	81	2 631 345	<b>0,000 000</b>	<b>0,000 000</b>	<b>0,009 550</b>
1999	81	2 607 474	<b>0,000 000</b>	<b>0,000 000</b>	<b>0,000 030</b>
2000	80	2 545 873	<b>0,000 000</b>	<b>0,000 008</b>	<b>0,000 040</b>
2001	72	2 490 440	<b>0,000 000</b>	<b>0,000 001</b>	<b>0,000 460</b>
2002	58	2 422 532	<b>0,000 000</b>	<b>0,000 000</b>	<b>0,001 790</b>
2003	38	2 339 375	0,973 846	<b>0,006 023</b>	0,551 376
2004	18	2 257 248	0,698 154	<b>0,000 001</b>	0,701 637
2005	6	2 181 276	<b>0,000 094</b>	<b>0,000 000</b>	0,243 762

Как следует из результатов, приведенных в табл. 1, в период с 1991 по 2002 гг. все три критерия ежегодно показали наличие кластеров больных карциномой щитовидной железы на территории Республики Беларусь.

Для построения кластеров заболеваемости по каждому году отдельно метод пространственной сканирующей статистики применялся с предельным размером кластера  $K = 20$ . Среди случаев заболевания карциномой щитовидной железы было найдено 13 значимых кластеров при уровне значимости, равном 0,05. Для каждого кластера  $p$ -значение оценивалось с помощью

999 моделирований по методу Монте-Карло (табл. 2), указаны также центр кластера, количество районов, вошедших в него, число случаев заболеваний в кластере, *p*-значение для проверки значимости кластеров.

Таблица 2  
Кластеры заболеваемости карциномой щитовидной железы по каждому году отдельно, построенные с помощью пространственной сканирующей статистики

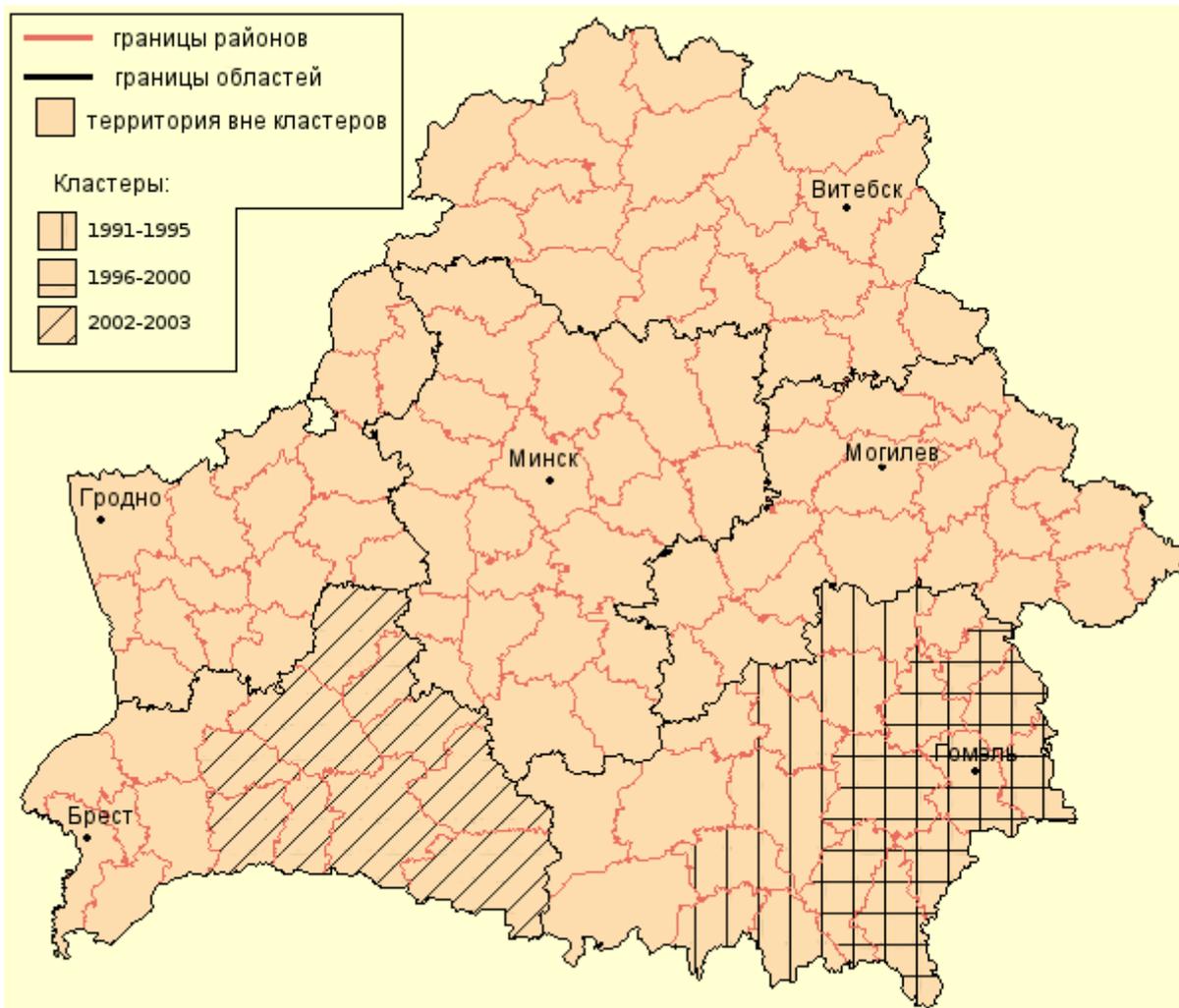
Год	Центр кластера	Число районов в кластере	Число случаев заболеваний	<i>p</i> -значение
1991	Брагин	13	38	<b>0,000</b>
1992	Речица	12	24	<b>0,000</b>
1993	Столин	5	24	<b>0,000</b>
1994	Брагин	15	46	<b>0,000</b>
1995	Лоев	12	44	<b>0,000</b>
1996	Речица	15	40	<b>0,000</b>
1997	Лоев	9	33	<b>0,000</b>
1998	Столин	1	9	<b>0,000</b>
1999	Брагин	15	41	<b>0,000</b>
2000	Хойники	14	35	<b>0,000</b>
2001	Лоев	11	27	<b>0,000</b>
2002	Столин	4	16	<b>0,000</b>
2003	Лоев	13	13	<b>0,040</b>

Для исследуемой популяции населения в возрасте до 18 лет был проведен пространственно-временной кластерный анализ для трех периодов: 1990–1995 гг., 1996–2001 гг., 2002–2005 гг. Для первого периода статистически значимый кластер был обнаружен в 1991–1995 гг., для второго периода – в 1996–2000 гг. и для третьего периода – в 2002–2003 гг. (рисунок).

Результаты пространственно-временного кластерного анализа даны в табл. 3. Каждый кластер представлен его центром, числом районов в кластере, *p*-значением для проверки значимости кластера, числом больных в кластере и численностью группы риска.

Таблица 3  
Кластеры заболеваемости карциномой щитовидной железы для трех периодов, построенные с использованием пространственно-временной сканирующей статистики

Годы	Центр кластера	Число районов в кластере	<i>p</i> -значение	Число заболеваний в кластере	Численность группы риска
Первый период					
1991–1995 гг.	Брагин	15	<b>0,000 000</b>	191	1 867 139
Второй период					
1996–2000 гг.	Лоев	9	<b>0,000 000</b>	145	1 122 012
Третий период					
2002–2003 гг.	Пинск	10	<b>0,000 000</b>	32	450 147



Кластеры заболеваемости карциномой щитовидной железы, построенные с использованием пространственно-временной сканирующей статистики

### Заключение

В работе рассмотрены критерии глобальной кластеризации и алгоритмы построения кластеров заболеваемости на изучаемой территории. В случае наличия аномальных наблюдений в данных о заболеваемости предложена робастная версия пространственной сканирующей статистики для построения кластеров. Критерии глобальной кластеризации позволили определить временные периоды, в которые наблюдался повышенный уровень заболеваемости карциномой щитовидной железы у популяции населения в возрасте до 18 лет на территории Республики Беларусь. С применением алгоритмов пространственного и пространственно-временного кластерного анализа построены кластеры заболеваемости карциномой щитовидной железы как отдельно по годам, так и заданным временным периодам.

### Список литературы

1. Rogerson, P. A set of associated statistical tests for detection of spatial clustering / P. Rogerson // *Ecological and Environmental Statistics*. – 2005. – Vol. 12. – P. 275–288.
2. Kulldorff, M. A spatial scan statistic / M. Kulldorff // *Common Statistics. Theory Methods*. – 1997. – No. 26 (6). – P. 1481–1496.
3. Tango, T. A spatial scan statistic with a restricted likelihood ratio / T. Tango // *Japanese Journal of Biometrics*. – 2008. – Vol. 29, no. 2. – P. 75–95.

4. Tango, T. A flexibly shaped scan statistic for detecting clusters / T. Tango, K. Takahashi // Intern. J. of Health Geographics. – 2005. – Vol. 4. – P. 115–125.
5. A flexibly shaped scan statistic for disease outbreak detection and monitoring / K. Takahashi [et al.] // Intern. J. of Health Geographics. – 2008. – Vol. 7. – P. 85–98.
6. Swartz, J.B. An entropy-based algorithm for detecting clusters of cases and controls and its comparison with a method using nearest neighbours / J.B. Swartz // Health Place. – 1998. – Vol. 4 – P. 67–77.
7. A test to detect clusters of disease / A.S. Whittemore [et al.] // Biometrika. – 1987. – Vol. 74. – P. 631–635.
8. Abramovich, M.S. Robust spatio-temporal cluster analysis of disease / M.S. Abramovich, M.M. Mitskevich // Proc. of the 10th Intern. Conf. «Computer Data Analysis and Modeling». – Minsk : Publishing center of BSU, 2013. – Vol. 2. – P. 95–98.
9. Хьюбер, П. Робастность в статистике / П. Хьюбер. – М. : Мир, 1984. – 303 с.

Поступила 20.09.2014

<sup>1</sup>НИИ прикладных проблем математики  
и информатики Белорусского  
государственного университета,  
Минск, пр. Независимости, 4  
e-mail: [abramovichms@bsu.by](mailto:abramovichms@bsu.by)

<sup>2</sup>ООО «Ай-Джи Дев»,  
Минск, ул. Интернациональная, 36-1  
e-mail: [serg.anishchenko@gmail.com](mailto:serg.anishchenko@gmail.com)

<sup>3</sup>Научно-практический центр детской онкологии,  
гематологии и иммунологии,  
Минский район, д. Боровляны, ул. Фрунзенская, 43  
e-mail: [budanov@oncology.by](mailto:budanov@oncology.by).

**M.S. Abramovich, S.V. Anishchanka, M.M. Mitskevich, O.I. Bydanov**

### **SPATIO-TEMPORAL CLUSTER ANALYSIS OF DISEASE**

The robust version of the spatial scanning statistics for clustering is proposed. Spatio-temporal cluster analysis algorithms were used for the cluster detection of incidence of thyroid carcinoma. Methods and algorithms of detection and building clusters for disease on studying territories are considered.

УДК 519.254

А.В. Жабинский

## РАСПОЗНАВАНИЕ ЭМОЦИЙ ПО ИЗОБРАЖЕНИЮ ЛИЦА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕКСТУРНОГО АНАЛИЗА

*Рассматривается роль текстуры (интенсивности пикселей) в задаче распознавания эмоций по изображению человеческого лица. Проводится сравнение текстуры и ключевых точек, а также предлагается комбинированный метод распознавания, объединяющий оба набора признаков.*

### Введение

Понимание эмоционального состояния человека является ключевым элементом множества областей деятельности, таких как социологические и психологические исследования, маркетинг, игровая индустрия и др. В большинстве случаев эта информация передается от человека к человеку с помощью невербальных средств. По данным исследований [1] 55 % информации об эмоциях порождается выражением лица. Поэтому для полноценного взаимодействия между человеком и компьютером крайне важным является создание эффективных алгоритмов распознавания эмоций.

Несмотря на более чем двадцатилетнюю историю развития, область распознавания эмоций все еще является слабо формализованной. Так, разные методы используют разные типы информации (текстовую, визуальную, аудио и др.), разные типы признаков (статические и динамические), разные модели представления (оптические потоки, соединенные вибрации, ключевые точки и др.) и, конечно же, разные алгоритмы. Обзор основных направлений можно найти в [2]. В настоящей работе сосредоточимся на анализе статических изображений лиц.

Практически все подобные методы можно условно разделить на два шага: извлечение признаков и непосредственное распознавание, однако содержание этих шагов сильно варьируется.

Так, например, на первом шаге можно выделить две основные группы признаков: общевизуальные и специфичные для лиц. К первой группе можно отнести все популярные в компьютерном зрении признаки. В работе [3] для получения признаков используются фильтры Габора, а в [4] – локальные бинарные шаблоны. Эти методы легко реализовать, однако, как правило, полученные признаки дают относительно низкую точность распознавания. К признакам, специфичным для лиц, можно отнести, в частности, 46 единиц действий (англ. action units) из системы кодирования выражений FACS, описывающих положение лицевых мышц (см., например, [5]). Однако наибольшее распространение получили наборы ключевых точек, описывающих основные элементы лица, и метод их получения – так называемые модели активного образа [6–8]. Распознавание в этом случае сводится к получению координат этих точек и обучению классификатора на их основе. Подобные методы дают высокую степень распознавания, интуитивно понятны и согласуются с теорией психологии эмоций. Вместе с тем большинство таких методов игнорирует информацию об интенсивности пикселей в области лица при выражении эмоций (по причинам, которые будут описаны далее, совокупность этих пикселей будем называть текстурой). В данной работе проводится оценка значимости этой информации, а также предлагается комбинированный метод, повышающий точность распознавания по сравнению с классическим подходом.

### 1. Метод на основе положения ключевых точек

Для адекватной оценки влияния интенсивности пикселей в области лица на точность распознавания эмоций необходимо в первую очередь определить базовый алгоритм, с которым будет проводиться сравнение. В данной работе в качестве базового используется один из вариантов классического алгоритма на основе положения ключевых точек.

По сути, этот алгоритм разделен на два этапа: получение координат ключевых точек и классификация эмоций на их основе. Классификация объектов по вектору признаков (в данном

случае координат точек) является стандартной задачей обучения с учителем и не представляет интереса. Следует лишь отметить, что использовался один из наиболее популярных классификаторов, а именно метод опорных векторов (англ. support vector machines, SVM).

Получение ключевых точек, однако, является гораздо более сложной задачей (рис. 1). Публикации последних лет (см., например, [2]), а также специализация крупнейших лабораторий по данной тематике позволяют говорить о том, что наиболее популярным методом являются так называемые модели активного образа (англ. active appearance models, AAM). Вкратце опишем его суть.

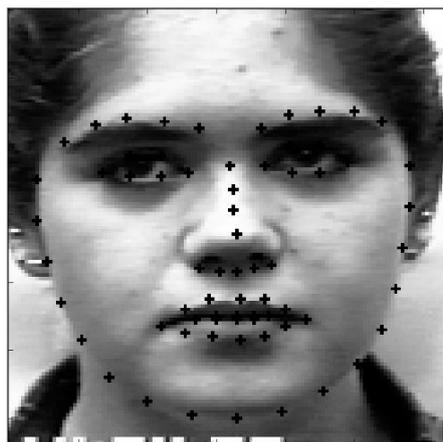


Рис. 1. Использование ключевых точек для описания контура основных элементов лица

Входными данными для метода является набор изображений лиц, в котором каждому изображению соответствует файл разметки, содержащий координаты ключевых точек, выбранных человеком. По этим данным ААМ строит две статистические модели:

*модель формы* – параметрическую линейную модель, описывающую возможные вариации положения ключевых точек. Формой при этом называется вектор координат ключевых точек  $s = (x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_n, y_n)^T$ ;

*модель текстуры* – сходную модель, но описывающую уже возможные вариации интенсивности пикселей. Соответственно текстурой называется вектор всех пикселей внутри внешнего контура формы  $t = (t_1, t_2, \dots, t_n)^T$ .

Поскольку на разных изображениях количество пикселей внутри внешнего контура формы может быть разным, перед созданием модели текстуры все изображения лиц приводятся к единой усредненной форме посредством кусочно-аффинного преобразования: множество точек формы триангулируется, а затем каждый симплекс обычным аффинным преобразованием транслируется в новые координаты (рис. 2). На это преобразование следует обратить внимание, поскольку оно также будет использоваться в методе на основе информации о текстуре.

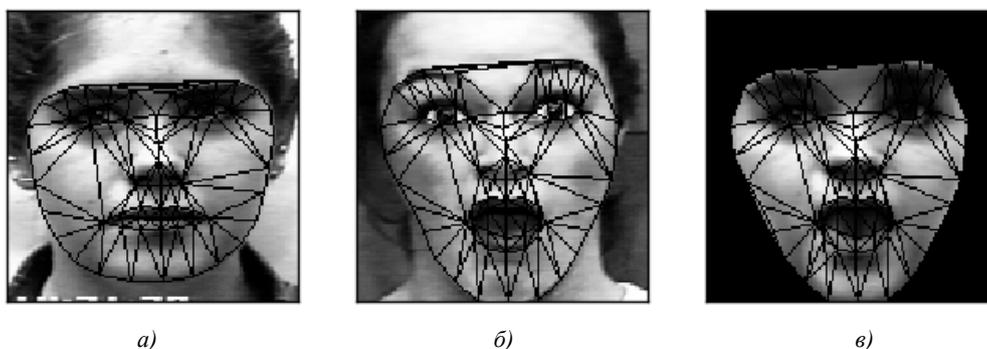


Рис. 2. Пример кусочно-аффинного преобразования: *а)* базовое изображение и соответствующая триангуляция по ключевым точкам (форме); *б)* аналогичное изображение с целевой формой; *в)* базовое изображение после приведения к целевой форме

При применении модели на новых изображениях вначале ищется примерное положение лица на фотографии, а затем полученные ранее модели формы и текстуры используются для итеративной подгонки под точные координаты элементов лица. Более подробно о моделях активного образа можно прочитать в [6, 7].

Здесь следует сделать замечание, которое является ключевым для данной работы: в этом подходе информация о текстуре используется для получения координат ключевых точек, но на этап классификации она не передается.

## 2. Метод на основе информации о текстуре

Возможность определения эмоций по положению и форме ключевых элементов лица хорошо изучена как психологами, так и специалистами в области информатики. В то же время аналогичные суждения в отношении текстуры практически не делались. Поэтому в первую очередь следует выдвинуть гипотезу о принципиальной возможности таких выводов.

**Гипотеза.** *Существует возможность определения (вручную или компьютерными средствами) выражения лица человека даже в отсутствие информации о положении и форме его ключевых элементов.*

Другими словами, предполагается, что эмоции на лице кодируются не только положением ключевых точек, но и другими признаками. Проверить это предположение, впрочем, не составляет труда. Для этого достаточно преобразовать лица, выражающие эмоции, к усредненной форме, а затем попытаться определить изначальное выражение. На рис. 3 изображен ряд лиц, к которым было применено такое преобразование.

Если присмотреться, то можно заметить, что все ключевые точки бровей, глаз, носа, губ, а также подбородка находятся в идентичном положении. Данные изображения получены путем триангуляции по ключевым точкам и применения уже знакомого нам кусочно-аффинного преобразования к снимкам лиц, выражающих эмоции. Несмотря на выравнивание положения ключевых элементов лица, эмоции на нем все еще легко угадываются по морщинам, теням и прочим элементам текстуры, что полностью подтверждает гипотезу.

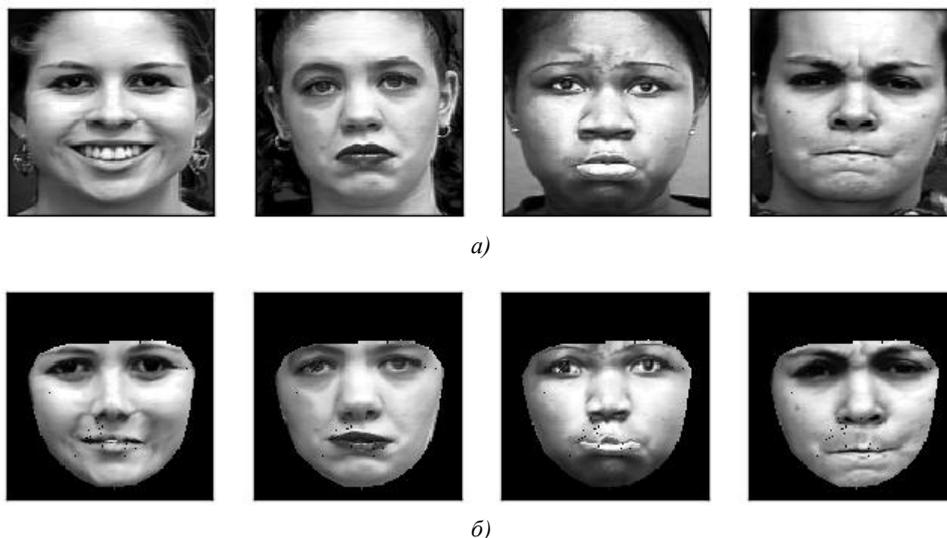


Рис. 3. Примеры приведения к средней форме: а) исходные изображения лиц; б) соответствующие изображения, приведенные к средней форме

Как и в методе на основе положения ключевых точек, преобразование к усредненной форме позволяет сформировать для каждого изображения соответствующий вектор текстуры:  $t = (t_1, t_2, \dots, t_n)^T$ , где  $n$  – количество пикселей внутри внешнего контура формы. Этот вектор можно напрямую использовать в качестве вектора признаков при классификации. В качестве классификатора можно применять уже известный нам SVM.

В итоге получаем следующий метод распознавания эмоций на основе информации о текстуре.

На этапе обучения:

1. Изображения подвергаются предварительной обработке, т. е. с помощью моделей активного образа на них определяются положения ключевых точек, а затем кусочно-аффинным преобразованием лица на изображениях приводятся к усредненной форме.

2. Пикселы полученных изображений вместе с соответствующими метками эмоций используются для обучения методом SVM.

На этапе применения:

1. По аналогии со стадией обучения новые изображения приводятся к средней форме.

2. Преобразованные изображения классифицируются с помощью обученной ранее модели.

Забегая вперед, скажем, что точность распознавания методом на основе текстуры лишь немного уступает точности классического подхода.

Подводя промежуточный итог, подчеркнем еще раз общие и отличительные черты двух методов. Оба включают этапы обучения (создания модели) и применения. Оба требуют предварительной обработки изображений для получения признаков. Первый метод использует в качестве признаков координаты ключевых точек (форму), полученных посредством моделей активного образа, второй – текстуру изображения внутри внешнего контура лица. В качестве конечного классификатора в обоих описанных методах используется SVM.

Также следует отметить, что в данной работе для приведения лиц к единой форме применяется модель активного образа, однако это не является обязательным требованием. Так, например, в работе [9] для аналогичных целей используется поиск нескольких ключевых точек и дальнейшее 3D-моделирование лица.

### 3. Комбинированный метод

Хотя описанные выше методы дают достаточно высокие результаты сами по себе, ничто не мешает объединить их, совместив оба набора признаков: координаты ключевых точек и интенсивности пикселов в области лица. Поскольку теоретическое обоснование для всех частей алгоритма уже было дано в предыдущих разделах, здесь просто опишем последовательность шагов комбинированного метода распознавания эмоций.

На этапе обучения:

1. К входным изображениям применяются модели активного образа для получения координат ключевых точек. Векторы ключевых точек для каждого изображения организуются в матрицу  $S$ .

2. К изображениям применяется кусочно-аффинное преобразование для приведения их к средней форме: для полученных на предыдущем шаге точек строится триангуляция Делоне, а затем пикселы внутри каждого отдельного треугольника отображаются на соответствующие пикселы внутри средней формы.

3. Пикселы каждого преобразованного изображения организуются в единый вектор признаков, а векторы для всех изображений организуются в матрицу  $T$ .

4. Матрицы  $S$  и  $T$  объединяются так, что каждый вектор  $s$  из матрицы  $S$  расширяется соответствующим вектором  $t$  из матрицы  $T$ . Другими словами, признаки из двух наборов объединяются в единый вектор. Результирующую матрицу назовем  $X$ .

5. Метки эмоций объединяются в единый вектор  $u$ .

6. Матрица данных  $X$  и вектор меток  $u$  используются для обучения модели SVM.

На этапе применения:

1. Новые изображения обрабатываются аналогично шагам 1–4 этапа обучения. В результате каждому изображению ставится в соответствие вектор  $x'$ , включающий в себя как данные о положении ключевых точек, так и пикселы трансформированного изображения.

2. Обученная на предыдущем этапе модель применяется к  $x'$  для предсказания изображенной эмоции.

Как и предполагалось, такой комбинированный подход дал точность, превосходящую результаты обоих описанных ранее методов.

#### 4. Результаты экспериментов

В качестве набора данных, на котором проводились эксперименты, использовалась расширенная база изображений Кона – Канаде (СК+) [10]. Эта база была составлена специально для изучения изображений лиц и в данный момент насчитывает 327 последовательностей кадров (от нейтрального выражения лица до ярко выраженной эмоции), при этом общее количество изображений превышает 10 000. Каждому изображению соответствует файл разметки с координатами ключевых точек  $x$ ,  $y$  (всего 68 пар), а каждой последовательности – файл с меткой эмоции. СК+ использует набор эмоций, предложенный Полом Экманом [11] и считающийся стандартом в задачах по их распознаванию. В этот набор входит шесть основных эмоций: гнев, страх, радость, грусть, удивление и отвращение. Дополнительно база СК+ содержит специальную метку отсутствия эмоций, однако в данной работе соответствующие изображения не использовались.

В качестве реализации ААМ была использована библиотека ААМToolbox [12], а для обучения конкретной модели активного образа – описанная выше база изображений СК+.

Полный цикл обучения моделей активного образа на базе данных СК+ на процессоре Intel i7 занимает около 3,5 ч. Время обучения классификатора SVM на 327 изображениях – от 5 до 7 с. Однако оба эти показателя относятся к стадии обучения. В то же время на стадии применения ААМ определяет положение ключевых точек в среднем за 180–190 мс, а SVM проводит классификацию примерно за 25 мс, что делает возможным использование разработанных алгоритмов в системах реального времени.

Точность распознавания определялась стандартным методом перекрестной проверки. При этом для обучения классификатора всегда использовалось последнее изображение (лицо, максимально сильно выражающее эмоцию) в каждой из последовательностей кадров (всего 327 изображений). По результатам десяти экспериментов были получены следующие результаты:

метод на основе ключевых точек – 89,4 % правильных ответов;

метод на основе текстуры – 86,3 % правильных ответов;

комбинированный метод – 93,5 % правильных ответов.

Таким образом, использование информации о текстуре позволило достичь результатов, сравнимых с точностью распознавания по ключевым точкам (86,3 % против 89,4 % при классическом подходе). Наилучший же результат показал комбинированный метод, давший 93,5 % корректных ответов.

#### Заключение

На основе полученных результатов можно говорить о том, что текстура несет значительную информацию о выражении человеческого лица и ее использование целесообразно для повышения точности распознавания. Важным моментом является приведение изображений лиц к единой форме, без которого использование вектора текстуры было бы невозможным.

Несмотря на то что в данной работе использовалась непосредственно интенсивность пикселей, для классификации могут применяться и более сложные визуальные признаки (например, основанные на фильтрах).

#### Список литературы

1. Mehrabian, A. Communication without words / A. Mehrabian // Psychology Today. – 1968. – Vol. 2, no. 4. – P. 53–56.
2. Tian, Y. Facial expression recognition / Y. Tian, T. Kanade, J. F. Cohn // Handbook of face recognition. – London : Springer, 2011. – P. 487–519.
3. Littlewort, G. Dynamics of facial expression extracted automatically from video / G. Littlewort, M.S. Bartlett, I. Fasel // Image and Computer Vision. – 2004. – Vol. 24, no. 6. – P. 615–625.

4. Shana, C. Facial expression recognition based on Local Binary Patterns: A comprehensive study / C. Shana, S. Gong, P.W McOwan // Image and Vision Computing. – 2009. – Vol. 27, no. 6. – P. 803–816.
5. Senechal, T. Impact of action unit detection in automatic emotion recognition / T. Senechal, K. Bailly, L. Prevost // Pattern Analysis and Applications. – 2014. – Vol. 17, no. 1. – P. 51–67.
6. Cootes, T.F. Active appearance models / T.F. Cootes, G.J. Edwards, C.J. Taylor // Lecture Notes in Computer Science. – 1998. – Vol. 1407. – P. 484–498.
7. Matthews, I. Active appearance models revisited / I. Matthews, S. Baker. // Intern. J. of Computer Vision. – 2004. – Vol. 60, no. 2. – P. 135–164.
8. Ratliff, M.S. Active appearance models for affect recognition using facial expressions: thesis by MD in CS / M.S. Ratliff. – Wilmington, 2010. – Vol. 4. – 89 p.
9. DeepFace: closing the gap to human-level performance in face verification / Y. Taigman [et al.] // Conference in Computer Vision and Pattern Recognition. – Columbus, OH, USA, 2014. – P. 1701–1708.
10. Kanade, T. Comprehensive database for facial expression analysis / T. Kanade, J.F. Cohn, Y. Tian // Proc. of the Fourth IEEE Intern. Conf. on Automatic Face and Gesture Recognition. – Grenoble, France, 2000. – P. 46.
11. Lucey, P. The Extended Cohn-Kanade Dataset (CK+): A complete expression dataset for action unit and emotion-specified expression / P. Lucey, J.F. Cohn., T. Kanade // Proc. of the Third Intern. Workshop on CVPR for Human Communicative Behavior Analysis. – San Francisco, CA, USA, 2010. – P. 94–101.
12. Библиотека ААМToolbox [Электронный ресурс] – Режим доступа : <https://github.com/phoenix367/ААМToolbox>. – Дата доступа : 01.06.2014.

Поступила 03.06.2014

*Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники,  
Минск, ул. П. Бровки, 6  
e-mail: andrei.zhabinski@gmail.com*

**A.V. Zhabinski**

## **EMOTION RECOGNITION USING TEXTURE ANALYSIS**

In the paper the role of texture (pixel values) in a task of emotion recognition in the image of a face is explored. Texture-based method is compared to classic methods based on coordinates of key point. In addition, a new combined method is presented that unites both sets of features.

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

УДК 658.512.2:621.9.06

Г.М. Левин, Б.М. Розин, О.И. Стеблинская

**ОПТИМИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЕМЫХ РЕЖИМОВ  
ГРУППОВОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ НА МНОГОПОЗИЦИОННОМ  
МНОГОИНСТРУМЕНТАЛЬНОМ ОБОРУДОВАНИИ**

*Рассматривается одна из задач определения рациональных режимов групповой обработки резанием следующих друг за другом идентичных подпоследовательностей заготовок деталей различных наименований на многопозиционном многоинструментальном оборудовании. Предполагается, что для деталей одного наименования режимы обработки должны быть одинаковыми, а для деталей разных наименований режимы могут быть различными при сохранении кинематических связей между частотами вращения шпинделей одной шпиндельной коробки. Разработанная математическая модель задачи ориентирована на минимизацию технологической себестоимости обработки группы заготовок деталей с учетом требуемой производительности и основных конструктивно-технологических ограничений по каждому из инструментов. Предлагается двухуровневый декомпозиционный подход к решению поставленной задачи.*

**Введение**

Задача определения рациональных режимов работы инструментальной наладки многопозиционного многоинструментального металлорежущего оборудования является одной из типовых в комплексе взаимосвязанных задач, возникающих при разработке технологических процессов обработки заготовок деталей на таком оборудовании в условиях серийного и массового производства. Решение этой достаточно сложной проектной задачи оказывает существенное влияние практически на все технико-экономические характеристики технологических процессов. Совокупность ряда технико-экономических и организационно-производственных факторов определяет целый спектр как возможных конкретных постановок задач в этой предметной области, так и методов их решения. К этим факторам можно отнести прежде всего принципы организации групповой обработки заготовок деталей различных наименований (если таковая предполагается), пространственно-временные взаимосвязи инструментов в проектируемом технологическом процессе, закладываемые в нем возможности оперативного управления режимами обработки непосредственно в ходе выполнения процесса, предполагаемую политику смены изношенных инструментов, формы представления зависимостей технико-экономических характеристик процесса обработки от режимов, учитываемые технико-экономические ограничения на допустимость различных значений режимов, принимаемые критерии оценки их эффективности и т. п.

Роль и место задачи определения рациональных режимов обработки металлов резанием в комплексе проблем, связанных с разработкой технологических процессов для многопозиционного многоинструментального металлорежущего оборудования в конкретных производственных условиях, вызывают к ней неизменный интерес исследователей. Различным аспектам этого класса задач и их конкретным постановкам посвящен ряд публикаций. Так, в работах [1–6] рассматривается процесс обработки резанием заготовок деталей одного наименования при автономной смене каждого из инструментов по истечении его расчетного периода стойкости, зависящего от условий работы инструмента и принимаемых режимов обработки. Анализ различных стратегий смены инструментов дан, в частности, в работах [7, 8]. Подходы к решению комплексной задачи одновременного выбора режимов обработки резанием с формированием групп одновременно сменяемых инструментов предложены в [9, 10] применительно к двум несколько отличающимся постановкам задач. В работах [11, 12] рассматриваются вопросы определения режимов групповой обработки резанием идентичных подпоследовательностей заготовок де-

талей различных наименований при условии, что эти режимы остаются неизменными для всех деталей. В [11] предполагается, что обработка заготовок деталей различных наименований осуществляется непересекающимися (по деталям) блоками инструментов, а в [12] исследуется более общий случай, когда такие блоки могут пересекаться. Обзор публикаций по достаточно широкому кругу вопросов оптимизации режимов обработки металлов резанием приведен, в частности, в [13].

Следует отметить, что известные модели и методы оптимизации режимов групповой обработки заготовок деталей на многопозиционном многоинструментальном металлорежущем оборудовании не в полной мере отражают специфику ряда постановок этой задачи, обусловленных возможностями современного оборудования. Интерес представляют, в частности, модели и методы, учитывающие возможности оперативного изменения режимов резания при переходе от обработки заготовок одних деталей к другим.

Предметом исследования в настоящей работе является задача оптимизации режимов параллельной групповой обработки заготовок деталей различных наименований на многопозиционном многоинструментальном металлорежущем оборудовании, в котором главное движение резания осуществляется за счет вращения инструментов, установленных, в частности, в многшпиндельных коробках. Типичным представителем такого класса оборудования являются многопозиционные агрегатные станки и сблокированные автоматические линии из агрегатных станков [14]. Рассматривается случай, когда как минутные подачи блоков инструментов, так и частоты вращения всех инструментов могут быть различными для разных деталей при дополнительном условии неизменности кинематических связей между частотами вращения инструментов одного блока. Это дополнительное требование возникает, в частности, в тех случаях, когда кинематическая схема шпиндельной коробки не может быть оперативно изменена. Естественно, управление режимами групповой обработки непосредственно в ходе процесса открывает дополнительные возможности для их оптимизации.

Здесь и далее под блоком инструментов подразумевается набор инструментов, установленных в одной шпиндельной коробке и связанных как единой минутной подачей, так и общим приводом вращения их шпинделей; под обработкой – обработка резанием; под деталью – заготовка детали.

### 1. Общая постановка задачи

Рассматривается процесс обработки на многопозиционном многоинструментальном металлорежущем оборудовании последовательности деталей, состоящей из одинаковых циклически повторяющихся подпоследовательностей (групп)  $\delta = (\delta_1, \dots, \delta_p, \dots, \delta_{\bar{h}})$  деталей различных наименований, где  $\delta_p \in \Delta$  и  $\Delta$  – множество наименований образующих эту группу деталей. Группа может содержать несколько деталей одного наименования, поэтому  $|\Delta| \leq \bar{h}$ .

Предполагаются следующие структура инструментальной наладки оборудования и общая схема ее функционирования:

1. Рабочие позиции линейно упорядочены, и все детали группы одна за другой в порядке их нумерации проходят последовательно обработку в общем случае на каждой из рабочих позиций также в порядке нумерации  $k = 1, 2, \dots, \bar{k}$  этих позиций, причем на каждой позиции в один и тот же период времени (такт) обрабатывается только одна (соответствующая такту и позиции) деталь последовательности.

2. После завершения любого такта обработки каждая обрабатываемая деталь со своей рабочей позиции перемещается на следующую позицию, с последней рабочей позиции обработанная деталь поступает на позицию разгрузки, на первую рабочую позицию поступает деталь с загрузочной позиции, а на загрузочной позиции устанавливается очередная обрабатываемая деталь последовательности. В ряде случаев позиции загрузки-разгрузки могут быть совмещены (например, на агрегатных станках с многопозиционным поворотным столом). Снятие и установка деталей на позициях загрузки-разгрузки совмещаются во времени с обработкой деталей на рабочих позициях.

Таким образом, процесс обработки всей последовательности деталей является циклическим, каждый цикл состоит из  $\bar{h}$  тактов и за один цикл с позиции разгрузки сходит одна группа  $\delta$  обработанных деталей.

3. На каждой (рабочей) позиции  $k \in K = \{1, 2, \dots, \bar{k}\}$  имеется свой набор  $J_k$  инструментальных блоков, а каждый такой блок  $j \in J_k$  оснащен своим набором  $I_{kj}$  обрабатывающих инструментов. В дальнейшем используется также следующая упрощенная индексация:  $kj$  – индекс блока из  $J_k$ ,  $kji$  – индекс инструмента  $i$  из  $I_{kj}$ .

4. Каждая деталь  $d \in \Delta$  обрабатывается на позиции  $k \in K$  своим набором  $J_{kd} \subseteq J_k$  блоков и своим набором  $I_{kjd} \subseteq I_{kj}$  инструментов в блоке  $j \in J_{kd}$ , причем для различных деталей из  $\Delta$  наборы как блоков, так и инструментов могут пересекаться. В дальнейшем  $\Delta_{kj}$  и  $\Delta_{kji}$  – множества деталей из  $\Delta$ , обрабатываемых блоком  $kj$  и инструментом  $kji$  соответственно.

5. Каждый из инструментов блока  $j \in J_k$  устанавливается в своем шпинделе одной шпиндельной коробки и при обработке детали  $d \in \Delta$  все инструменты из  $J_{kd}$  могут иметь только одну общую минутную подачу  $S_{kjd}$ , причем при переходе к обработке другой детали из  $\Delta$  эта подача может меняться. С целью упрощения изложения в дальнейшем для индексации шпинделей используется индексация соответствующих блоков и инструментов.

6. Каждый шпиндель  $kji$  имеет свою заранее устанавливаемую (для данного группового процесса) кинематическую связь с приводом вращения шпинделей блока  $kj$ . Предполагается, что частота вращения этого привода, а следовательно, и частоты вращения  $n_{kjid}$  всех инструментов  $i \in I_{kj}$  остаются неизменными в процессе обработки конкретной детали  $d \in \Delta_{kj}$ . При переходе к обработке другой детали из  $\Delta_{kj}$  частота вращения привода блока  $kj$  может быть изменена при неизменных кинематических связях привода со всеми шпинделями этого блока, что приводит к пропорциональному изменению частот вращения всех шпинделей блока. Таким образом, если  $r_{kjd}$  – отношение частоты вращения привода блока  $kj$  при обработке детали  $d \in \Delta_{kj}$  к частоте его вращения при обработке детали  $d_{kj} \in \Delta_{kj}$ , принимаемой за базовую, то  $n_{kjid} = n_{kjid_{kj}} r_{kjd}$  для всех инструментов  $i \in I_{kj}$ . В дальнейшем для упрощения изложения положим  $q_{kji} = n_{kjid_{kj}}$  и  $r_{kjd_{kj}} = 1$ , тогда  $n_{kjid} = q_{kji} r_{kjd}$  для всех  $d \in \Delta$ ,  $k \in K$ ,  $j \in J_{kd}$ ,  $i \in I_{kjd}$ .

7. В каждом такте  $h \in H = \{1, 2, \dots, \bar{h}\}$  на каждой позиции  $k \in K$  обработка соответствующей (такту и позиции) детали  $d \in \Delta$  осуществляется параллельно всеми блоками из  $J_{kd}$  и всеми инструментами  $I_{kjd}$  каждого такого блока. Таким образом, длительность обработки детали  $d$  на позиции  $k$  равна максимальной из длительностей ее обработки блоками из  $J_{kd}$ , а длительность такта  $h$  – максимальной из длительностей обработки соответствующих деталей по каждой позиции из  $K$  плюс дополнительное время на перемещение деталей и подвод-отвод инструментальных блоков. Это дополнительное время практически не зависит от режимов обработки, может быть исключено из времени загрузки оборудования и в дальнейшем не учитываться. Машинное время обработки одной группы деталей (время цикла) равно сумме длительностей всех  $\bar{h}$  тактов цикла.

8. Используется одна из следующих схем смены изношенных инструментов:

– инструменты сменяются независимо друг от друга после обработки каждым из них своего расчетного (исходя из его стойкости при принимаемых режимах обработки) количества деталей;

– инструменты сменяются целиком инструментальными блоками независимо друг от друга также после обработки блоком расчетного (исходя из стойкости лимитирующего в этом блоке инструмента) количества деталей.

Общее среднее время обработки одной группы деталей складывается из длительности цикла, а также отнесенных к одному циклу времени на смену изношенного инструмента и дополнительного времени на обслуживание оборудования. Первые две из этих величин существенно зависят от принимаемых режимов обработки, а третью можно считать пропорциональной длительности цикла с заданным коэффициентом пропорциональности.

Общие средние материальные затраты на обработку одной группы деталей складываются из стоимости соответствующего машинного времени, отнесенным к этому времени затратам на

обслуживание оборудования и отнесенным к одному циклу обработки затратам на инструмент и замену изношенного инструмента.

Поскольку при заданном диаметре инструмента скорость резания однозначно определяется частотой его вращения, в дальнейшем в качестве искомого параметра вместо скорости резания при обработке детали  $d \in \Delta$  инструментом  $kji$  рассматривается частота его вращения  $n_{kjid} = q_{kji} r_{kjd}$ . Таким образом, искомые режимы обработки деталей в проектируемом групповом технологическом процессе однозначно определяются значениями  $S_{kjd}$ ,  $r_{kjd}$  и  $q_{kji}$  для всех  $d \in \Delta$ ,  $k \in K$ ,  $j \in J_{kd}$ ,  $i \in I_{kjd}$ , а определение наивыгоднейших режимов обработки для всего процесса сводится к определению наилучших значений этих параметров.

Предполагаются заданными следующие исходные параметры для выбора режимов обработки в групповом технологическом процессе:

– предельно допустимое (исходя из требуемой производительности и имеющегося фонда времени работы оборудования) значение  $T_0$  среднего общего времени обработки одной группы деталей;

– длина  $l_{kjid}$  резания, глубина и диаметр резания для каждого инструмента и детали; диапазоны  $[\underline{s}_{kjid}, \bar{s}_{kjid}]$  и  $[\underline{n}_{kjid}, \bar{n}_{kjid}]$  допустимых подач на оборот и частот вращения при обработке детали  $d \in \Delta$  инструментом  $i \in I_{kjd}$ ,  $k \in K$ ,  $j \in J_{kd}$ , а также максимально допустимые значения  $\bar{R}_{kjidz}$  зависящих от режимов резания ряда характеристик этого процесса (шероховатость, усилия резания, крутящий момент, температура в зоне резания и др.),  $z = 1, 2, \dots, \bar{z}_{kjid}$ ;

– величина  $L_{kjd}$  рабочего хода и диапазон  $[\underline{S}_{kjd}, \bar{S}_{kjd}]$  возможных минутных подач при обработке детали  $d \in \Delta$  блоком инструментов  $j \in J_{kd}$ ,  $k \in K$ ;

– предельно допустимое варьирование частот вращения привода блока  $j \in J_k$ , т. е. максимально допустимое значение  $\bar{r}_{kj}$  отношения  $\max\{r_{kjd}|d \in \Delta\} / \min\{r_{kjd}|d \in \Delta\}$ ,  $k \in K$ ;

– используемые характеристики (см. ниже) обрабатываемости детали  $d \in \Delta$  инструментом  $i \in I_{kjd}$ , определяющие зависимость периода стойкости инструмента и отмеченных выше характеристик процесса резания от принимаемых режимов обработки;

– стоимость  $E_1$  станкоминуты (включая обслуживание оборудования), а также материальные  $g_{1kji}$  (или  $g_{1kj}$ ) и временные  $g_{2kji}$  (или  $g_{2kj}$ ) затраты, связанные с одной сменой инструмента  $i \in I_{kj}$  (или всего блока  $j \in J_k$  инструментов),  $j \in J_k$ ,  $k \in K$ .

Наивыгоднейшими считаются такие режимы обработки, которые минимизируют предполагаемые общие средние затраты на обработку одной группы деталей при обеспечении требуемой производительности и отмеченных выше ограничений.

Основное отличие рассматриваемой в этой работе постановки задачи от изученных ранее в [1–6] связано с тем, что параметры  $S_{kjd}$  и  $n_{kjid}$  для всех  $k \in K$ ,  $j \in J_k$  и  $i \in I_{kj}$  могут изменяться при переходе от обработки одной детали  $d \in \Delta$  к другой. Следует отметить, что если все детали группы рассматривать как различные, то фактически указанные параметры обработки могут изменяться от такта к такту. Это, в свою очередь, дает еще большие возможности для их оптимизации.

В данной работе, как и в [1, 5], предполагаются заданными следующие аппроксимации зависимостей от режимов обработки (минутной подачи  $S$  и частоты вращения  $n$ ) периодов стойкости  $T$  инструментов и других упомянутых выше характеристик  $R_z$  процесса для различных инструментов и деталей (индексы  $k$ ,  $j$ ,  $i$  и  $d$  в этих соотношениях опущены):

$$T(S, n) = \min\{C / (S^{\eta_u} n^{\mu_u} + G_u) | u = 1, \dots, \bar{u}\}; \quad (1)$$

$$R_z(S, n) = \tilde{C}_z S^{\alpha_z} n^{\beta_z}, \quad z = 1, 2, \dots \quad (2)$$

Все параметры  $C > 0$ ,  $\eta_u, \mu_u, G_u > 0$ ,  $\bar{u}$ ,  $\tilde{C}_z > 0$ ,  $\alpha_z$  и  $\beta_z$  считаются известными для всех деталей и обрабатывающих их инструментов, причем в реальных ситуациях, как правило,  $\eta_u, \mu_u > 1$  для всех инструментов и деталей. Соотношения (1) и (2) предполагают фиксированными глубину резания и диаметр инструмента.

## 2. Математическая модель

Поскольку в рассматриваемой проектной задаче процесс обработки последовательности деталей является циклическим, при построении математической модели этой задачи без ограничения общности можно предположить, что деталь  $\delta_1$  на последней рабочей позиции  $\bar{k}$  обрабатывается в первом такте. Таким образом, в такте  $h \in H$  на позиции  $k \in K$  обрабатывается деталь  $d(k, h) = \delta_{\chi(k, h)} \in \Delta$ , где  $\chi(k, h) = 1 + \text{mod}((\bar{h} + \bar{k} + h - 1 - \text{mod}(k, \bar{h})), \bar{h})$ .

В качестве управляемых переменных модели, определяющих искомые режимы групповой обработки, примем введенные выше параметры  $S_{kjd}$ ,  $r_{kjd}$  и  $q_{kji}$  для всех  $d \in \Delta$ ,  $k \in K$ ,  $j \in J_{kd}$ ,  $i \in I_{kjd}$ , полагая  $r_{kjd kj} = 1$  для выделенной для каждой пары  $kj$  детали  $d_{kj} \in \Delta_{kj}$ . Тогда  $n_{kjid} = q_{kji} r_{kjd}$  – частота вращения инструмента  $kji$  при обработке детали  $d \in \Delta$ ;  $x_{kjid} = (S_{kjd}, n_{kjid})$  – искомый режим обработки инструментом  $kji$  детали  $d \in \Delta$ ;  $X_{kjd} = (S_{kjd}, (n_{kjid} | i \in I_{kjd}))$  – режим обработки детали  $d \in \Delta$  на позиции  $k \in K$  инструментами блока  $j \in J_{kd}$ ;  $X_{kd} = (X_{kjd} | j \in J_{kd})$  – режим обработки детали  $d \in \Delta$  на позиции  $k \in K$  всеми блоками инструментов  $j \in J_{kd}$ ;  $X_h = (X_{kd(k, h)} | k \in K)$  – режим работы инструментальной наладки в такте  $h \in H$ ;  $X = (X_h | h \in H)$  – режим работы инструментальной наладки в целом при обработке всей группы  $\delta$  деталей, причем в дальнейшем  $X$  рассматривается также как вектор с компонентами  $S_{kjd}$ ,  $r_{kjd}$  и  $q_{kji}$ ,  $d \in \Delta$ ,  $k \in K$ ,  $j \in J_{kd}$ ,  $i \in I_{kjd}$ .

Аналогично [3] принята следующая структура переменных (зависящих от значений вектора  $X$  искомых режимов обработки) частей  $\Theta_p(X)$  материальных ( $p = 1$ ) и временных ( $p = 2$ ) затрат на обработку одной партии  $\delta$  деталей:

$$\Theta_p(X) = E_p t_m(X) + Q_p(X), \quad p = 1, 2, \quad (3)$$

где  $E_p$  – заданные коэффициенты, учитывающие такие факторы, как стоимость станкоминуты, надежность оборудования и затраты на его обслуживание, зарплату обслуживающего персонала и т. п.;  $t_m(X)$  – переменная (зависящая от режимов резания) часть машинного времени, затрачиваемого на обработку одной группы деталей;  $Q_p(X)$  – затраты на инструменты и их смену, приведенные к обработке одной группы деталей.

Зависимость машинного времени  $t_m(X)$  от режимов обработки  $X$  определяется следующим образом. При фиксированном значении  $X$  время обработки детали  $d \in \Delta$  на позиции  $k \in K$  подмножеством  $I_{kjd}$  инструментов блока  $j \in J_{kd}$  равно  $t_{kjd}(X) = L_{kjd} / S_{kjd}$ ; время обработки детали  $d \in \Delta$  на позиции  $k \in K$  всеми инструментальными блоками из  $J_{kd}$  равно  $t_{kd}(X) = \max\{t_{kjd}(X) | j \in J_{kd}\}$ ; время обработки соответствующих деталей из  $\Delta$  в такте  $h \in H$  равно  $\max\{t_{kd(k, h)}(X) | k \in K\}$ . Таким образом, общее машинное время обработки всей группы  $\delta$  деталей

$$t_m(X) = \sum_{h \in H} t_h(X) = \sum_{h \in H} \max\{L_{kjd(k, h)} / S_{kjd(k, h)} | k \in K, j \in J_{kd(k, h)}\}. \quad (4)$$

Зависимость приведенных материальных ( $p = 1$ ) и временных ( $p = 2$ ) затрат  $Q_p(X)$  на инструмент и его смену от принятых режимов обработки  $X$  определяется как числом  $D_{kji}(X)$  групп деталей, которое может быть обработано каждым инструментом  $kji$  наладки за расчетный период его стойкости при этих режимах, так и принятой политикой смены инструментов.

В соответствии с (1) при фиксированном значении вектора  $X$  режимов обработки число групп деталей, которое может обработать инструмент  $kji$  за расчетный период его стойкости, определяется соотношением

$$\begin{aligned} D_{kji}(X) &= \left( \sum_{d \in \Delta_{kji}} h_d l_{kjid} / S_{kjd} T_{kjid}(S_{kjd}, n_{kjid}) \right)^{-1} = \\ &= \left( \sum_{d \in \Delta_{kji}} h_d l_{kjid} / S_{kjd} \min\{C_{kjidu} / (S_{kjd}^{n_{kjidu}} (q_{kji} r_{kjd})^{u_{kjid}} + G_{kjidu}) | u = 1, \dots, \bar{u}_{kjid}\} \right)^{-1}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $h_d$  – число деталей  $d \in \Delta$  в группе. Здесь, как уже отмечалось, параметры  $C_{kjid}$ ,  $\eta_{kjidu}$ ,  $\mu_{kjidu}$ ,  $G_{kjidu}$  и  $\bar{u}_{kjid}$  можно считать заданными. При смене инструментов блоками число групп деталей, которое может быть обработано блоком  $kj$  за расчетный период стойкости всех его инструментов, определяется соотношением

$$D_{kj}(X) = \min\{D_{kji}(X) \mid i \in I_{kj}\}. \quad (6)$$

Из (5) и (6) получаем следующие зависимости приведенных материальных и временных затрат на инструмент и его смену от принятых режимов обработки  $X$  при автономной смене инструментов ( $Q_{p1}(X)$ ) и при смене инструментов блоками ( $Q_{p2}(X)$ ):

$$Q_{p1}(X) = \sum_{k \in K} \sum_{j \in J_k} \sum_{i \in I_{kj}} g_{pkji} / D_{kji}(X), \quad p = 1, 2; \quad (7)$$

$$Q_{p2}(X) = \sum_{k \in K} \sum_{j \in J_k} g_{pkj} / D_{kj}(X), \quad p = 1, 2. \quad (8)$$

Исходя из (3)–(7) приходим к следующим оценкам переменных частей  $\Theta_{pw}(X)$  материальных и временных затрат на обработку одной партии  $\delta$  деталей в зависимости от искомых режимов обработки  $X$  при автономной смене инструментов ( $w = 1$ ) и при смене инструментов блоками ( $w = 2$ ):

$$\begin{aligned} \Theta_{p1}(X) = & E_p \sum_{h \in H} \max\{L_{kj d(k,h)} / S_{kj d(k,h)} \mid k \in K, j \in J_{kd(k,h)}\} + \\ & + \sum_{k \in K} \sum_{j \in J_k} \sum_{i \in I_{kj}} g_{pkji} \sum_{d \in \Delta_{kji}} h_d l_{kjid} \max\{\underline{C}_{kjidu} S_{kj d}^{\tilde{\eta}_{kjidu}} (q_{kji} r_{kj d})^{\mu_{kjidu}} + \underline{G}_{kjidu} / S_{kj d} \mid u = 1, \dots, \bar{u}_{kjid}\}; \quad (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Theta_{p2}(X) = & E_p \sum_{h \in H} \max\{L_{kj d(k,h)} / S_{kj d(k,h)} \mid k \in K, j \in J_{kd(k,h)}\} + \\ & + \sum_{k \in K} \sum_{j \in J_k} g_{pkj} \max\{\sum_{d \in \Delta_{kji}} h_d l_{kjid} \max\{\underline{C}_{kjidu} S_{kj d}^{\tilde{\eta}_{kjidu}} (q_{kji} r_{kj d})^{\mu_{kjidu}} + \underline{G}_{kjidu} / S_{kj d} \mid u = 1, \dots, \bar{u}_{kjid}\} \mid i \in I_{kj}\}, \quad (10) \end{aligned}$$

где  $\underline{C}_{kjidu} = 1/C_{kjidu}$ ,  $\underline{G}_{kjidu} = G_{kjidu}/C_{kjidu}$  и  $\tilde{\eta}_{kjidu} = \eta_{kjidu} - 1$ .

Таким образом, рассматриваемая проектная задача по определению наивыгоднейших режимов обработки при сделанных выше предположениях и допущениях сводится к следующей задаче математического программирования:

$$\Theta_{1w}(X) \rightarrow \min; \quad (11)$$

$$\Theta_{2w}(X) \leq T_0; \quad (12)$$

$$\underline{S}_{kj d} \leq S_{kj d} \leq \bar{S}_{kj d}, \quad k \in K, j \in J_k, d \in \Delta_{kj}; \quad (13)$$

$$\underline{n}_{kji} \leq q_{kji} r_{kj d} \leq \bar{n}_{kji}, \quad k \in K, j \in J_k, i \in I_{kj}, d \in \Delta_{kji}; \quad (14)$$

$$\underline{s}_{kjid} \leq S_{kj d} / q_{kji} r_{kj d} \leq \bar{s}_{kjid}, \quad k \in K, j \in J_k, i \in I_{kj}, d \in \Delta_{kji}; \quad (15)$$

$$\tilde{C}_{kjidz} S_{kj d}^{\alpha_{kjidz}} (q_{kji} r_{kj d})^{\beta_{kjidz}} \leq \bar{R}_{kjidz}, \quad k \in K, j \in J_k, i \in I_{kj}, d \in \Delta_{kj d}, z \in Z_{kjid}; \quad (16)$$

$$r_{kjd'}/r_{kj d''} \leq \bar{r}_{kj}, \quad k \in K, \quad j \in J_k, \quad d', d'' \in \Delta_{kj}, \quad (17)$$

где  $w = 1$  при автономной смене инструментов и  $w = 2$  при смене инструментов блоками;  $Z_{kjid}$  – множество индексов учитываемых характеристик процесса обработки детали  $d$  инструментом  $kji$ ,  $r_{kjd_{kj}} = 1$  для всех  $k \in K, j \in J_k$ .

В этой модели соотношение (11) отражает минимизацию себестоимости обработки группы деталей; соотношение (12) обеспечивает заданную производительность; соотношения (13)–(15) – принадлежность искомым параметрам процесса обработки заданным диапазонам; соотношения (16) учитывают требования к максимальным значениям различных физических характеристик процесса (усилию и мощности резания, шероховатости, температуре в зоне резания и т. д.); соотношение (17) обеспечивает допустимые изменения частот вращения привода каждого блока инструментов.

### 3. Метод решения

Введем в рассмотрение множитель Лагранжа  $\lambda \in [0, 1]$  и функции Лагранжа

$$\Psi_w(\lambda, X) = \lambda \Theta_{1w}(X) + (1-\lambda) \Theta_{2w}(X), \quad w = 1, 2. \quad (18)$$

Пусть  $\mathbf{X}_0$  – непустое множество значений вектора  $X$  искомым параметрам, удовлетворяющих ограничениям (13)–(17). Обозначим через  $X_w^*(\lambda)$  значение  $X \in \mathbf{X}_0$ , минимизирующее функцию  $\Psi_w(\lambda, X)$  при фиксированном значении  $\lambda \in [0, 1]$ , и положим  $\Theta_{pw}(\lambda) = \Theta_{pw}(X_w^*(\lambda))$ .

Очевидно, если  $\Theta_{2w}(1) \leq T_0$ , то  $X_w^*(1)$  – решение задачи  $\mathbf{A}_w$ , а если  $\Theta_{2w}(0) > T_0$ , то задача  $\mathbf{A}_w$  не имеет решения, поскольку  $\Theta_{2w}(X) > T_0$  для всех  $X \in \mathbf{X}_0$ . Поскольку задача  $\mathbf{A}_w$  заменой искомым переменных их логарифмами сводится к задаче выпуклого программирования, то в остальных случаях существует  $\lambda_w^* \in [0, 1)$  такое, что  $\Theta_{2w}(\lambda_w^*) = T_0$ , причем  $X_w^*(\lambda_w^*)$  является решением исходной задачи  $\mathbf{A}_w$ . Нетрудно показать, что функция  $\Theta_{2w}(\lambda)$  является неубывающей, а функция  $\Theta_{1w}(\lambda)$  невозрастающей по  $\lambda$  на интервале  $[0, 1)$ . Таким образом, для нахождения  $\lambda_w^* \in [0, 1)$  (задача  $\mathbf{B}_{1w}$ ) могут быть использованы известные методы поиска корня уравнения с монотонной левой частью, при этом для вычисления значения  $\Theta_{2w}(\lambda)$  при фиксированном  $\lambda \in [0, 1)$  необходимо определить  $X_w^*(\lambda) \in \mathbf{X}_0$  (задача  $\mathbf{B}_{2w}(\lambda)$ ).

Для решения задачи  $\mathbf{B}_{2w}(\lambda)$  при фиксированном  $\lambda$  может быть использован следующий подход, сводящий ее к задаче выпуклого программирования с линейными ограничениями посредством замены искомым переменных их логарифмами. Положим  $\tilde{S}_{kjd} = \ln S_{kjd}$ ,  $\tilde{r}_{kjd} = \ln r_{kjd}$  и  $\tilde{q}_{kji} = \ln q_{kji}$  для всех  $d \in \Delta, k \in K, j \in J_{kd}, i \in I_{kjd}$ , причем  $\tilde{r}_{kjd_{kj}} = 0$ .

Обозначим через  $\tilde{X}$  вектор, получаемый из  $X$  заменой всех его компонентов их логарифмами, и введем в рассмотрение функции  $\tilde{\Psi}_1(\lambda, \tilde{X})$  и  $\tilde{\Psi}_2(\lambda, \tilde{X})$ , получаемые из функций (18) соответствующей заменой переменных:

$$\begin{aligned} \tilde{\Psi}_1(\lambda, \tilde{X}) = & (\lambda E_1 + (1-\lambda)E_2) \sum_{h \in H} \max \{ L_{kjd(k,h)} e^{-\tilde{S}_{kjd(k,h)}} \mid k \in K, j \in J_{kd(k,h)} \} + \\ & + \sum_{k \in K} \sum_{j \in J_k} \sum_{i \in I_{kj}} (\lambda g_{1kj} + (1-\lambda)g_{2kj}) \sum_{d \in \Delta_{kji}} h_{dkjid} \max \{ \underline{C}_{kjidu} e^{\tilde{n}_{kjid} + \tilde{S}_{kjd} + 4\tilde{q}_{kji} + \tilde{r}_{kjd}} + \\ & + \underline{G}_{kjidu} e^{-\tilde{S}_{kjd}} \mid u = 1, \dots, \bar{u}_{kjid} \}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{\Psi}_2(\lambda, \tilde{X}) = & (\lambda E_1 + (1-\lambda)E_2) \sum_{h \in H} \max \{ L_{kjd(k,h)} e^{-\tilde{S}_{kjd(k,h)}} \mid k \in K, j \in J_{kd(k,h)} \} + \\ & + \sum_{k \in K} \sum_{j \in J_k} (\lambda g_{1kj} + (1-\lambda)g_{2kj}) \max \{ \sum_{d \in \Delta_{kji}} h_d l_{kjid} \max \{ \underline{C}_{kjidu} e^{\tilde{n}_{kjid} \tilde{S}_{kjd} + \mu_{kjidu} (\tilde{q}_{kji} + \tilde{r}_{kjd})} + \\ & + \underline{G}_{kjidu} e^{-\tilde{S}_{kjd}} \mid u = 1, \dots, \bar{u}_{kjid} \} \mid i \in I_{kjd} \}. \end{aligned}$$

Тогда решение задачи  $\mathbf{B}_{2w}(\lambda)$  для соответствующего  $w = 1, 2$  может быть получено в результате решения следующей задачи (задачи  $\mathbf{B}'_{2w}(\lambda)$ ):

$$\tilde{\Psi}_w(\lambda, \tilde{X}) \rightarrow \min;$$

$$\ln \underline{S}_{kjd} \leq \tilde{S}_{kjd} \leq \ln \bar{S}_{kjd}, \quad k \in K, j \in J_k, d \in \Delta_{kj};$$

$$\ln \underline{n}_{kjid} \leq \tilde{q}_{kji} + \tilde{r}_{kjd} \leq \ln \bar{n}_{kjid}, \quad k \in K, j \in J_k, i \in I_{kj}, d \in \Delta_{kji};$$

$$\ln \underline{s}_{kjid} \leq \tilde{S}_{kjd} - \tilde{q}_{kji} - \tilde{r}_{kjd} \leq \ln \bar{s}_{kjid}, \quad k \in K, j \in J_k, i \in I_{kj}, d \in \Delta_{kji};$$

$$\alpha_{kjidz} \tilde{S}_{kjd} + \beta_{kjidz} (\tilde{q}_{kji} + \tilde{r}_{kjd}) \leq \ln(\bar{R}_{kjidz} - \tilde{C}_{kjidz}), \quad k \in K, j \in J_k, i \in I_{kj}, d \in \Delta_{kjd}, z \in Z_{kjid};$$

$$\tilde{r}_{kjd'} - \tilde{r}_{kjd''} \leq \ln \bar{r}_{kj}, \quad k \in K, j \in J_k, d', d'' \in \Delta_{kj}.$$

Решение задачи  $\mathbf{B}'_{2w}(\lambda)$  может быть получено известными методами решения задач выпуклого программирования с линейными ограничениями.

### Заключение

В работе представлены математическая модель и метод оптимизации динамически изменяемых режимов работы инструментальной наладки при параллельной групповой обработке деталей различных наименований на многопозиционном многоинструментальном металлорежущем оборудовании в случае, когда кинематические связи между частотами вращения инструментов в каждом блоке остаются неизменными. Минимизируется технологическая себестоимость обработки группы деталей с учетом требуемой производительности и основных конструктивно-технологических ограничений по каждому из инструментов.

Предлагается двухуровневый декомпозиционный подход к решению поставленной оптимизационной задачи, сводящий ее решение к решению двух более простых взаимосвязанных подзадач. На верхнем уровне решается координирующая подзадача нахождения подходящего значения множителя Лагранжа, связывающего целевую функцию и ограничение по производительности, а на нижнем – задача нахождения значений искомым параметров режимов обработки, минимизирующих полученную функцию Лагранжа при фиксированном значении множителя Лагранжа. Первая из этих подзадач сводится к нахождению корня уравнения с монотонной левой частью, а вторая – к задаче выпуклого программирования с линейными ограничениями.

В качестве направления дальнейших исследований предполагается рассмотреть новые постановки задач определения рациональных режимов работы инструментальных наладок металлорежущего оборудования для серийного и массового производства с учетом современных тенденций развития производственных систем. В частности, планируется более полно учесть возможности, открываемые широким использованием программного управления при реконфи-

гурируемости оборудования и оперативном управлении работой инструментальной наладки в складывающихся ситуациях, в том числе с учетом динамики износа инструментов и его влияния на характеристики процесса резания. Интерес представляет также сопоставление с помощью соответствующих моделей различных схем управления функционированием инструментальной наладки с тем, чтобы оценить целесообразность каждой из этих схем в конкретной производственной ситуации с учетом дополнительных затрат на их обеспечение.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект Ф12ФП-001).

### Список литературы

1. Горанский, Г.К. Оптимизация режимов работы металлорежущего оборудования / Г.К. Горанский, Г.М. Левин, В.С. Танаев // Вычислительная техника в машиностроении : науч.-техн. сб. – Минск : Ин-т техн. кибернетики АН БССР, 1970. – Март. – С. 102–114.
2. Оптимизация режимов резания на металлорежущих станках / А.М. Гильман [и др.]. – М. : Машиностроение, 1972. – 188 с.
3. Гордиенко, Б.И. Качество инструмента и производительность / Б.И. Гордиенко, М.А. Краплин. – Ростов-н/Д : РГУ, 1974. – 579 с.
4. Игумнов, Б.Н. Расчет оптимальных режимов обработки для станков и автоматических линий / Б.Н. Игумнов. – М. : Машиностроение, 1974. – 198 с.
5. Левин, Г.М. Декомпозиционные методы оптимизации проектных решений / Г.М. Левин, В.С. Танаев. – Минск : Наука и техника, 1978. – 240 с.
6. Жак, С.В. Оптимизация проектных решений в машиностроении / С.В. Жак. – Ростов-н/Д : РГУ, 1982. – 168 с.
7. Shabtay, D. Optimization of the Machining Economics Problem Under the Failure Replacement Strategy / D. Shabtay, M. Kaspi // Intern. J. of Production Economics. – 2002. – Vol. 80, no. 3. – P. 213–230.
8. Shabtay, D. The efficiency range of economical cutting conditions and tool replacement under the age replacement strategy / D. Shabtay, M. Kaspi // Intern. J. of Production Research. – 2003. – Vol. 41, no. 11. – P. 2563–2580.
9. Szadkowski, J. The tool blocks replacement strategies optimization for multi tool machining / IXth Intern. Conf. on Tools. – Hungary, Miskolc, 1996. – P. 801–806.
10. Левин, Г.М. Оптимизация режимов многоинструментальной обработки при групповой смене инструментов / Г.М. Левин, Б.М. Розин // Информатика. – 2011. – № 3 (31). – С. 33–47.
11. Левин, Г.М. Оптимизация режимов групповой обработки деталей непересекающимися блоками инструментов на многопозиционном оборудовании / Г.М. Левин, Б.М. Розин // Информатика. – 2011. – № 4 (32). – С. 33–47.
12. Rozin, B. Optimization of multi-tool cutting modes in multi-item batch manufacturing system / B. Rozin, G. Levin, A. Dolgui // Proc. of the IFAC Conf. on Manufacturing Modelling, Management and Control (MIM'2013). – SPb., Russia, 2013. – P. 766–771.
13. Mukherjee, I. A review of optimization techniques in metal cutting processes / I. Mukherjee, P.K. Ray // Computers and Industrial Engineering. – 2006. – Vol. 50, no. 1. – P. 15–34.
14. Вороничев, Н.М. Автоматические линии из агрегатных станков / Н.М. Вороничев, Ж.Э. Тартаковский, В.Б. Генин. – 2-е изд. – М. : Машиностроение, 1979. – 488 с.

Поступила 23.10.2014

*Объединенный институт проблем  
информатики НАН Беларуси,  
Минск, Сурганова, 6  
e-mail: {levin; rozin}@newman.bas-net.by,  
olga.bodak@tut.by*

**G.M. Levin, B.M. Rozin, O.I. Steblinskaya**

**OPTIMIZATION OF DYNAMICALLY VARIABLE CUTTING MODES  
OF BATCH PROCESSING ON MULTI-POSITION MULTI-TOOL EQUIPMENT**

One of the problems of defining the rational cutting modes of batch processing of different parts on multi-position multi-tool equipment is considered. It is assumed that the modes for identical parts should be the same and the modes for different parts could be different while maintaining the kinematic relations between rotational speeds of the spindles of one spindle box. The mathematical model of the problem is developed. The model is aimed at minimizing the cost of batch processing taking into account the required throughput and technological constraints for each of the tools. The two-level decomposition approach to solve the problem is proposed.

УДК 004.946; 621.9.06

Б.М. Розин, В.Е. Зданович

## К СИНТЕЗУ КОМПОНОВОК АГРЕГАТНЫХ СТАНКОВ ДЛЯ ГРУППОВОЙ ОБРАБОТКИ

*Рассматриваются задачи выбора оптимальных типоразмеров основных узлов и сборочных единиц агрегатных станков для групповой обработки деталей. Предлагаются алгоритмы решения некоторых таких задач за счет оптимизации взаимного размещения элементов узлов, а также алгоритм построения 3D-моделей элементов компоновок агрегатных станков в графической системе T-Flex. Приводятся структура и методика использования программной подсистемы формирования и оценки компоновок агрегатных станков для групповой обработки.*

### Введение

Применяемые в настоящее время в машиностроении металлорежущие агрегатные станки (АС) являются более производительными и экономичными по сравнению с универсальным оборудованием. Они используются в производственных системах для крупносерийного изготовления конкретных деталей [1–9]. АС komponуются в основном из кинематически не связанных унифицированных (нормализованных, стандартизованных) узлов определенного функционального назначения – агрегатов. Благодаря широкому применению унифицированных узлов и деталей объем конструкторских работ при проектировании агрегатного станка по сравнению с проектированием специального станка такой же сложности сокращается примерно в пять-шесть раз. Основными унифицированными сборочными единицами, из которых komponуются АС, являются:

базовые корпусные узлы – станины, стойки, кронштейны;  
узлы главного движения и подачи – силовые головки, силовые столы, фрезерные, расточные, сверлильные бабки, шпиндельные коробки и др.;

устройства для перемещения обрабатываемых заготовок – поворотные и прямолинейные делительные столы, манипуляторы.

АС используются для изготовления деталей разных габаритных размеров, требующих большого количества технологических переходов. На таких станках осуществляются в основном следующие операции обработки резанием: сверление, зенкерование, развертывание и растачивание отверстий, нарезание резьбы, обтачивание и фрезерование наружных поверхностей, протачивание канавок, подрезание торцов, а также раскатывание цилиндрических и конических отверстий.

В зависимости от способа закрепления и перемещения обрабатываемой заготовки станки бывают: со стационарным (неподвижным) приспособлением; с многопозиционным приспособлением на поворотном делительном столе с вертикальной осью вращения; с многопозиционным приспособлением на поворотном делительном барабане с горизонтальной осью вращения; с многопозиционным приспособлением на многопозиционном передвижном столе. Станки с поворотными делительными столами (рис. 1, а) или барабанами наиболее эффективны при изготовлении деталей средних и малых размеров. Станки с многопозиционными передвижными столами (рис. 1, б) и со стационарными приспособлениями (рис. 1, в) применяются в основном для выполнения тяжелых операций или многоинструментальной обработки крупногабаритных массивных заготовок.

Одной из основных задач при проектировании АС для групповой обработки наряду с синтезом технологического процесса (ТП) является формирование его компоновки. Под компоновкой АС понимается совокупность его узлов и их взаимное расположение.

Структура и параметры ТП, в том числе количество рабочих позиций, количество и состав выполняемых блочных технологических переходов на каждой позиции, перечень координатных движений, их величина, взаимное расположение инструментов и заготовки и др., во многом определяют компоновочную схему станка. С другой стороны, при выборе ТП, как пра-

вило, учитываются возможности потенциально реализуемых компоновочных схем АС. Для заданных ТП и структурной схемы АС, используя унифицированные узлы, можно создавать несколько компоновок АС разных размеров.

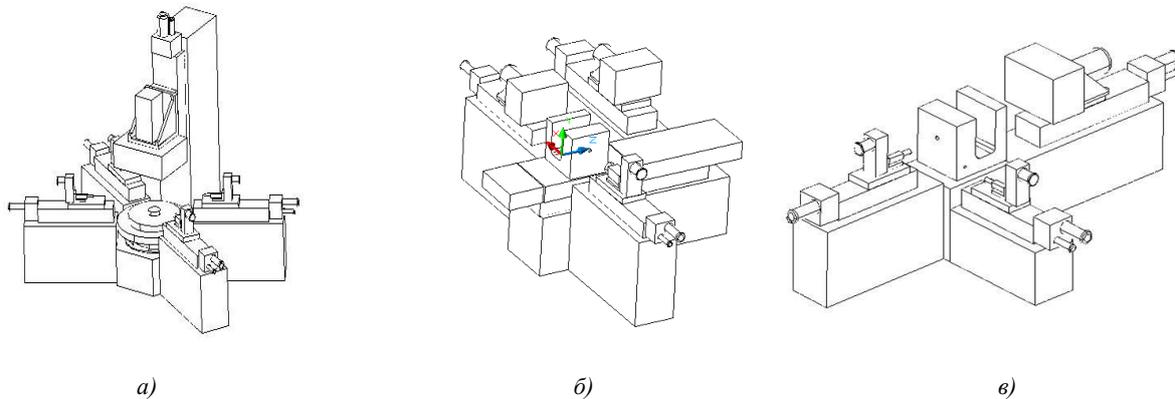


Рис. 1. Типовые компоновки АС: а) с поворотным делительным столом; б) с передвижным столом; в) со стационарным приспособлением

В ряде исследований автоматизированное формирование компоновки АС разбивается, как правило, на этапы синтеза структурной схемы компоновки и параметрического синтеза АС для заданной его структурной схемы [4, 10–14]. В некоторых работах выбор основных характеристик структурной схемы совмещается с выбором схемы технологического процесса [15–17].

Для построения множества возможных вариантов структурных схем компоновок используются их систематизация и кодирование в зависимости от видов обработки и направления подач [4], состава и способов сопряжения узлов [12–14], а также синтез координатного, блочного и элементного кодов компоновки станка [10]. Поскольку для большей части АС важное значение имеет вид транспортирования заготовки, в сокращенное обозначение введены также траектория движения заготовок и характер ее изменения во времени [4].

Для оценки и отсеивания неперспективных вариантов структурных схем АС, как правило, используется иерархически упорядоченная система критериев качества компоновки. К основным критериям обычно относятся производительность, точность и др. Для вариантов АС, обеспечивающих требуемые производительность и точность, дальнейший отбор производится по таким критериям, как стоимость станка, себестоимость обработки на нем, металлоемкость, габариты и др. При выборе схемы компоновки также принимают во внимание такие дополнительные характеристики, как удобство смены инструментов и заготовок, отвода стружки, снижение влияния веса узлов на точность обработки и др. [10]. Ранжирование критериев позволяет выполнять отбор вариантов структурной схемы в несколько подэтапов, последовательно сужая множество просматриваемых вариантов.

В работе [17] описан подход к выбору принципиальной компоновочной схемы АС с поворотным столом на этапе формирования структуры группового технологического процесса, когда определяются количество рабочих позиций, количество и состав групп технологических переходов для каждой позиции, предварительные режимы обработки для этих переходов. В качестве целевой функции при выборе предпочтительного варианта группового технологического процесса используется линейная свертка чисел позиций обработки, состава и типа блочных технологических переходов, выполняемых узлами АС, и состава каждого блочного перехода.

Параметрический синтез для заданного варианта компоновочной схемы включает определение типоразмеров основных (унифицированных либо оригинальных) силовых и корпусных узлов, параметров их взаимного расположения, удовлетворяющих ряду конструктивно-технологических и эргономических ограничений. Под типоразмером понимается совокупность нескольких основных параметров узла, указанных однозначно или в виде допустимых интерва-

лов значений. Для унифицированных узлов значения основных параметров выбираются из дискретного ряда, для оригинальных узлов эти параметры могут изменяться непрерывно.

В качестве примера в таблице приведен ряд типоразмеров унифицированных поворотных многошпиндельных коробок УЕ3515 для исполнений 01-14 (рис. 2). В качестве основных параметров, определяющих типоразмер коробки, используются ее диаметр  $D$  и высота  $H$  прямоугольной части, предназначенной для размещения шпинделей.

Типоразмеры поворотной шпиндельной коробки УЕ3515

Обозначение типоразмера шпиндельной коробки	Размеры шпиндельной коробки, мм	
	$D$	$H$
УЕ3515 (01-02)	400	305
УЕ3515 (03-04)	500	425
УЕ3515 (05-06)	560	490
УЕ3515 (07-10)	630	560
УЕ3515 (11-12)	710	630
УЕ3515 (13-14)	800	710

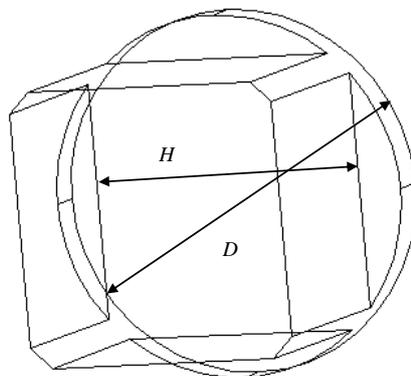


Рис. 2. Упрощенная 3D-модель поворотной коробки УЕ3515

При выборе типоразмеров унифицированных узлов либо определении размеров оригинальных узлов АС при фиксированной структуре технологического процесса и структурной схеме компоновки возникают задачи оптимизации, которые по составу управляемых параметров можно условно разделить на два типа: задачи определения оптимального типоразмера узла за счет выбора взаимного расположения элементов узла и задачи определения оптимального типоразмера узла и АС в целом за счет выбора размещения обрабатываемых заготовок на приспособлении.

К формированию компоновки АС относятся также определение и размещение компонентов дополнительного оборудования.

При оценке построенного варианта компоновки АС проектантом существенное значение имеют не только состав его узлов и значения характеристик, но и визуальное отображение его 3D-модели. Ряд работ посвящен средствам двумерного графического отображения компоновок станка и их программной реализации. В частности, в работе [14] после синтеза варианта компоновки на экране отображается эскиз станка во фронтальной проекции и выводятся его технико-экономические характеристики. Базовые узлы, которые могут входить в состав компоновки, описаны в подпрограммах и содержат кроме массива координат точек, определяющих геометрию каждого узла, обращения к подпрограммам геометрических преобразований, изменяющим исходное изображение узлов в соответствии со значениями параметров. Программные средства, реализующие предложенный подход, базируются на языке ФОРТРАН с использованием графического пакета «Графор».

В работах [18–20] для визуального восприятия полученных координатных кодов вариантов компоновок предложен другой способ их графического синтеза. Основные элементы узлов компоновки представлены параллелепипедами (имеющими возможность вырождаться в призмы) и цилиндрами. После передачи системе графического 3D-синтеза информации о структуре и узлах, входящих в состав компоновки, формируется ее графическая модель. В каждой из описываемых в работах систем имеется возможность масштабирования объектов компоновки, изменения угла зрения (вращения модели относительно осей координат), редактирования любых объектов и их компонентов, участвующих в процессе графического моделирования компоновки станка. Графические модули систем используют графический стандарт OpenGL.

В системах графического синтеза, описанных в работах [14, 18–20], модели компоновок отображались либо двухмерным эскизом, либо с помощью матриц преобразования координат создавалась иллюзия трехмерного пространства, но процесс создания такого рода программных средств достаточно трудоемкий, а полученное графическое изображение не дает полного представления о компоновке станка.

В настоящее время все большее применение в конструкторских организациях находят системы геометрического моделирования (СГМ), такие как AutoCAD, КОМПАС-3D, T-Flex. Они позволяют оперативно создавать твердотельные параметрические 3D-модели любого уровня сложности. Применение подобного рода систем позволяет не только облегчить визуальную оценку разработанной модели АС, но и провести ее прочностные расчеты при достаточной степени детализации.

Для автоматизации процесса построения компоновок АС в Объединенном институте проблем информатики НАН Беларуси разработана подсистема «Компоновка» системы «Агрегат» [15, 16], которая позволяет получить 3D-модель компоновки станка в системе Mechanical Desktop [21].

Настоящая работа посвящена созданию на базе подсистемы «Компоновка» средств автоматизации выбора оптимальных типоразмеров унифицированных узлов, а также определения размеров оригинальных узлов АС для заданной компоновочной схемы и построения 3D-моделей АС для визуального анализа формируемых вариантов его компоновок. Основное внимание при этом уделяется групповым ТП для АС, предназначенных для серийной обработки деталей различных наименований.

### **1. Задачи выбора оптимальных типоразмеров узлов компоновок АС для групповой обработки деталей**

Рассматриваемые далее задачи выбора типоразмеров узлов характерны для автоматизированного проектирования компоновок АС, когда за счет использования высокопроизводительной вычислительной техники имеется возможность оперативно формировать, оценивать и сравнивать большое количество вариантов компоновок. При выборе типоразмеров узлов АС обычно требуется оптимизировать такие технико-экономические характеристики АС, как материалоемкость, габариты, стоимость, являющиеся, как правило, возрастающими функциями типоразмеров его узлов. При этом предполагается, что изменение типоразмера узла в известном диапазоне несущественно влияет на точность его обработки и надежность.

Вклад типоразмеров отдельных узлов и сборочных единиц в обобщенную оптимизируемую характеристику АС учитывается посредством соответствующих весовых коэффициентов.

Типоразмеры ряда унифицированных узлов АС при заданных структуре и параметрах технологического процесса выбираются как наименьшие, удовлетворяющие условию обеспечения выполнения операций ТП независимо от расположения обрабатываемых деталей на приспособлении. К таким узлам относятся, в частности, силовые бабки, вспомогательное оборудование (инструментальные шкафы, стружкосборники, гидростанции). Типоразмеры других унифицированных узлов и сборочных единиц, таких, например, как шпиндельные коробки, силовые и крестовые столы, на которых размещаются шпиндельные коробки и силовые бабки, либо размеры оригинальных узлов, таких как центральные и боковые станины, стойки и подставки, могут существенно зависеть от размещения на приспособлении обрабатываемых деталей.

Рассмотрим некоторые задачи оптимизации типоразмеров отдельных узлов АС при фиксированной структуре и параметрах ТП, структурной схеме его компоновки и параметрах размещения деталей на позициях.

*Задача 1.1.* Оптимизация размеров оригинальной прямоугольной центральной тумбы стационарного приспособления для обработки одной детали.

Исходные данные: координаты центров обрабатываемых конструктивно-технологических элементов (КТЭ) в системе координат детали, параметры процесса обработки КТЭ, режимы резания.

Управляемые переменные: положение детали в системе координат станка, размеры поверхности тумбы.

Критерии: площадь поверхности тумбы.

Ограничения: обеспечение размещения станин боковых приставок в пределах граней тумбы.

*Задача 1.2.* Оптимизация типоразмера литья унифицированной поворотной шпиндельной коробки.

Исходные данные: координаты центров обрабатываемых КТЭ в системе координат станка, параметры процесса обработки КТЭ, режимы резания.

Управляемые переменные: координаты оси вращения вала (центра) поворотной коробки в системе координат станка.

Критерии: габаритный диаметр шпиндельной коробки.

Ограничения: обеспечение минимально допустимых расстояний между центрами шпинделей и центром поворотной коробки и между центрами каждой пары шпинделей.

*Задача 1.3.* Оптимизация типоразмера унифицированного крестового стола для групповой обработки деталей набором шпиндельных бабок (фрезерных, расточных, сверлильных и т. п.).

Исходные данные: число бабок; габаритные размеры каждой бабки; величины базы и длины съема инструмента для каждой бабки; координаты центров КТЭ всех деталей, обрабатываемых каждой бабкой, в системе координат станка; параметры процесса обработки КТЭ; режимы резания.

Управляемые переменные: координаты осей вращения шпиндельных бабок, центра платформы и центра каретки крестового стола в системе координат станка.

Критерии: ширина, длина и ход платформы, а также ход каретки крестового стола.

Ограничения: достаточность размеров платформы для размещения всех бабок, достаточность хода платформы для обеспечения совмещения шпинделя каждой бабки с центром соответствующего обрабатываемого КТЭ, обеспечение размещения станины боковой приставки в пределах грани центральной станины приспособления.

Среди задач выбора оптимальных типоразмеров узлов и АС в целом за счет выбора положения деталей на приспособлении можно выделить следующие:

*Задача 2.1.* Выбор оптимального типоразмера литья унифицированной вертикальной шпиндельной коробки для обработки одновременно на нескольких позициях АС с поворотным столом деталей однородной партии за счет выбора положения заготовки в секторе загрузочной позиции.

Исходные данные: координаты центров обрабатываемых КТЭ в системе координат детали, параметры технологического процесса обработки, режимы резания.

Управляемые переменные: положение детали в системе координат станка.

Критерии: габаритные размеры шпиндельной коробки.

Ограничения: размещение детали (зажимного приспособления) в пределах сектора загрузочной позиции, обеспечение минимально допустимых расстояний между центрами каждой пары шпинделей, обеспечение размещения передней грани подставки под вертикальную стойку боковой приставки в пределах грани центральной станины приспособления.

*Задача 2.2.* Выбор оптимального типоразмера литья унифицированной поворотной шпиндельной коробки за счет выбора размещения заготовок деталей группы на загрузочной позиции.

Исходные данные: параметры технологического процесса обработки КТЭ всех деталей, режимы резания для КТЭ этих деталей.

Управляемые переменные: положение деталей в системе координат станка на загрузочной позиции.

Критерии: габаритный диаметр шпиндельной коробки.

Ограничения: размещение деталей (зажимных приспособлений) в пределах сектора загрузочной позиции, обеспечение минимально допустимых расстояний между центрами шпинделей и центром поворотной коробки и между центрами каждой пары шпинделей, обеспечение размещения станины боковой приставки в пределах грани центральной станины приспособления.

*Задача 2.3.* Выбор оптимального типоразмера унифицированного крестового стола для групповой обработки деталей набором шпиндельных бабок (сверлильных, фрезерных, расточных и т. п.) за счет выбора размещения заготовок деталей на загрузочной позиции.

Исходные данные: число бабок; габаритные размеры каждой бабки; величины базы и длины съема инструмента для каждой бабки; координаты центров КТЭ всех деталей, обрабатываемых каждой бабкой, в системе координат станка; параметры процесса обработки КТЭ; режимы резания.

Управляемые переменные: положение деталей в системе координат станка на загрузочной позиции.

Критерии: ширина, длина и ход платформы, а также ход каретки крестового стола.

Ограничения: достаточность размеров платформы для размещения всех бабок, достаточность хода платформы для подвода каждой бабки для обработки соответствующих КТЭ, обеспечение размещения станины боковой приставки в пределах грани центральной станины приспособления.

Следует отметить, что задачи второго типа, как правило, являются существенно более сложными в отношении как свойств множества допустимых планов, так и характера зависимостей оптимизируемых характеристик от управляемых переменных. Анализ свойств задачи 2.1 показал, что множество допустимых планов задачи в общем случае является невыпуклым и даже многосвязным, а сама задача – многоэкстремальной. Поэтому для решения задач оптимизации типоразмеров узлов АС второго типа представляется целесообразным применять методы, основанные на комбинации приемов декомпозиции экстремальных задач и метаэвристиках. Перспективными могут быть также диалоговые процедуры, позволяющие проектанту оперативно перемещать модели деталей на виртуальном приспособлении и строить модифицированную 3D-модель АС для каждого нового их расположения. При этом проектант для поиска наилучшего размещения деталей на виртуальном приспособлении может использовать опыт проектирования, учесть ряд дополнительных условий размещения приспособления на позиции загрузки, которые не всегда могут быть формализованы. Кроме того, при сложной форме детали визуальная проверка пользователем расположения приспособления на позиции с учетом ограничений невыхода за границы сектора окружности может оказаться проще, чем ее проверка в автоматическом режиме.

## **2. Формирование компоновок АС для групповой обработки в подсистеме «Компоновка» программного комплекса «Агрегат»**

Комплекс алгоритмов и программных средств формирования компоновки металлорежущих АС, реализованный в виде подсистемы «Компоновка» системы «Агрегат», предназначенной для проектирования на этапе аванпроектирования АС, был разработан в Объединенном институте проблем информатики НАН Беларуси [15, 16]. Подсистема разработана при поддержке и участии специалистов Барановичского завода автомобильных линий и Минского завода автоматических линий им. П.М. Машерова и базируется на накопленном на этих предприятиях опыте проектирования агрегатного оборудования. Подсистема «Компоновка» ориентирована на проектирование трех наиболее распространенных типов металлорежущих АС: с приспособлением на многопозиционном поворотном столе, на двухпозиционном передвижном столе, а также стационарных АС.

В отличие от описанной в [15, 16] версии подсистемы, предназначенной для обработки последовательности деталей одного наименования, функции описываемой здесь новой версии подсистемы «Компоновка» распространены на групповые процессы обработки партий деталей нескольких наименований.

Подсистема предусматривает формирование варианта компоновочной схемы АС, обеспечивающего выполнение требований технического задания по обработке заданной группы дета-

лей с учетом требуемой производительности, точности и т. п., и расчет характеристик АС (стоимости, массы, габаритов, занимаемой площади). При этом используется информация о структуре и параметрах технологического процесса обработки, о составе и ориентации силовых столов, а также вводимые пользователем в диалоге данные об основных параметрах приспособления и инструментальной наладки. Результатом работы подсистемы является сформированный состав оборудования, его основные характеристики и упрощенная твердотельная 3D-модель, пригодная для получения чертежей любых проекций построенного АС в графической системе Mechanical Desktop [21].

Формирование варианта компоновки АС для групповой обработки в подсистеме включает следующие этапы:

- размещение заготовок деталей группы на загрузочной позиции АС и их позиционирование (отображение положения деталей на все рабочие позиции);
- выбор состава и типоразмеров основных узлов АС;
- определение параметров расположения этих узлов;
- выбор состава, типоразмеров и расположения дополнительного оборудования;
- построение (при необходимости) 3D-модели АС;
- оценку технико-экономических характеристик станка (стоимости, массы, габаритов).

Предусмотрена возможность корректировки проектантом получаемых решений.

После размещения и позиционирования деталей проектировщику предлагается ввести в режиме диалога начальные значения некоторых основных параметров планируемого приспособления. Кроме того, выбирается наименьший диаметр планшайбы поворотного стола (для станка с поворотным столом), либо габариты передвигного стола, либо габариты тумбы стационарного приспособления, достаточные для закрепления деталей и для требуемого количества боковых приставок, соответствующего числу и типу определенных технологическим процессом силовых столов.

Далее подсистема осуществляет выбор из базы данных системы типоразмеров основных унифицированных силовых и корпусных узлов (либо определение размеров оригинальных узлов) боковых приставок и задает их взаимное пространственное расположение. Для выбора размеров некоторых основных узлов (тумбы центральной станины стационарного приспособления, поворотной коробки, крестового стола) применяются алгоритмы, описанные в разд. 3.

Типоразмеры узлов боковой приставки выбираются, начиная с силового узла (шпиндельной коробки или силовой бабки), непосредственно выполняющего операцию, в последовательности их базирования: в качестве каждого следующего узла выбирается узел, на котором базируется предыдущий узел вплоть до боковой станины (или подставки), которая крепится к фундаменту. При этом типоразмер силового узла выбирается наименьшим, обеспечивающим выполнение операций, предусмотренных технологическим процессом. Типоразмер же очередного узла в последовательности должен быть не меньшим, чем типоразмер предыдущего узла. Более того, как правило, типоразмеры всех узлов в цепочке совпадают, поскольку увеличение типоразмера любого узла цепочки по отношению к предыдущему узлу приводит к увеличению массы, стоимости и габаритов АС в целом. Тем не менее увеличение типоразмера некоторого узла цепочки (как и всех последующих узлов цепочки) может быть продиктовано другими технико-технологическими требованиями. В качестве примера цепочки узлов боковой приставки, содержащей вертикальный силовой стол, можно привести сверлильную (сверлильно-резьбонарезную либо иную) шпиндельную коробку, силовой угольник, вертикальный силовой стол, боковую стойку, подставку. При определении параметров размещения основных узлов учитываются также условия взаимного пространственного расположения узлов соседних приставок (отсутствие пересечения, достаточное расстояние для обеспечения обслуживания наладки и др.).

Когда вариант компоновки основных узлов сформирован, выполняется диалоговая процедура подбора и размещения в проекции «в плане» АС компонент дополнительного оборудования. Затем вычисляются основные характеристики полученного АС, пространственная модель которого отображается в графической среде системы Mechanical Desktop для визуального анализа и вывода на печать различных ее проекций.

В подсистеме реализован также режим («Эскиз») формирования компоновки под управлением проектанта (без размещения деталей на приспособлении), когда проектант самостоя-

тельно выбирает тип станка, его параметры, типоразмеры, состав боковых приставок и взаимное расположение их узлов. После завершения выбора в этом режиме узлов и задания их расположения проектанту предоставляется возможность построить 3D-модель сформированной компоновки АС, рассчитать его массу, габариты и стоимость.

### 2.1. Установка и позиционирование деталей

При выполнении установки каждой детали в положение обработки предусмотрено раздельное определение ее координаты по вертикальной оси и координат на горизонтальной плоскости приспособления (проекция «в плане»). На рис. 3 показаны упрощенные 3D-модели деталей, составляющих группу для обработки на АС с поворотным столом, на рис. 4 – некоторое выбранное размещение этих двух деталей в секторе загрузочной позиции на плоскости поворотного стола в проекции «в плане». Изображенные на рис. 4 концентрические окружности соответствуют различным возможным диаметрам планшайбы унифицированных поворотных столов.

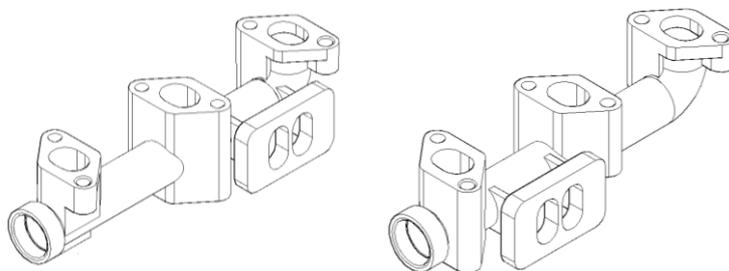


Рис. 3. Упрощенные 3D-модели деталей

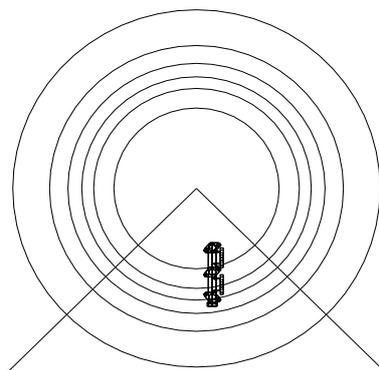


Рис. 4. Установка деталей в положение обработки на планшайбе поворотного стола

При позиционировании деталей определяется их положение в каждой из предусмотренных технологическим процессом позиций обработки (рис. 5).

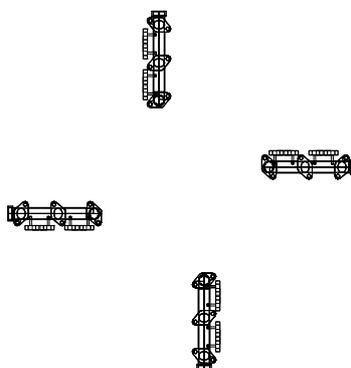


Рис. 5. Результат позиционирования обрабатываемых деталей на АС с поворотным столом с четырьмя возможными позициями, включая загрузочную

## 2.2. Выбор типоразмеров узлов компоновки АС

Типоразмер унифицированного поворотного стола и соответствующей ему центральной станины АС выбирается по принципу минимального диаметра планшайбы, позволяющего разместить 3D-модель детали (деталей) и соответствующего приспособления в секторе позиции поворотного стола. Аналогично определяются типоразмер унифицированного передвижного стола либо размеры оригинальной тумбы стационарного станка.

Типоразмеры шпиндельных коробок и бабок выбираются из базы данных с учетом параметров технологического процесса обработки на соответствующей позиции.

Типоразмеры силовых угольников, силовых и крестовых столов выбираются с учетом рассчитываемых суммарных характеристик усилий, мощности, скоростей минутной подачи, крутящего момента, величин рабочего хода, базы и длин съема инструментов и др., а также типоразмеров устанавливаемых на них шпиндельных коробок и бабок.

Типоразмеры унифицированных боковых станин, стоек и подставок выбираются из базы данных, либо эти узлы формируются как оригинальные с учетом типоразмеров размещаемых на них силовых либо крестовых столов и их характеристик.

Расположение узлов выбранных типоразмеров определяется с учетом правил взаимного базирования узлов боковой приставки, ряда условий и ограничений. Среди таких правил следует отметить следующие: шпиндельная коробка крепится к силовому угольнику, который, в свою очередь, устанавливается на платформе силового стола, при этом ширина привалочной плоскости угольника должна быть не меньше ширины платформы стола; угольник не должен свисать с этой платформы. Базирование боковой станины (подставки) на центральной станине (тумбе) приспособления для закрепления деталей должно обеспечивать размещение передней грани боковой станины в пределах соответствующей грани центральной станины, достаточное расстояние между соседними боковыми приставками и др.

Пример компоновки АС с двумя боковыми приставками, снабженными горизонтальными силовыми столами, показан на рис. 6. В частности, боковая приставка, расположенная на первой рабочей грани приспособления, состоит из поворотной шпиндельной коробки, револьверной бабки, электромеханического силового стола и боковой станины.

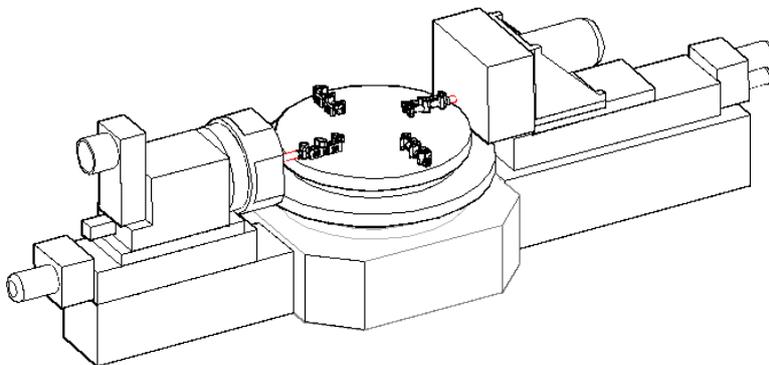


Рис. 6. Упрощенная 3D-модель АС с поворотным столом

Для некоторых узлов реализованы алгоритмы оптимизации их типоразмеров, описание которых дается в разд. 3.

## 3. Алгоритмы выбора оптимальных типоразмеров узлов компоновок АС

В подсистеме «Компоновка» реализован ряд алгоритмов выбора оптимальных типоразмеров некоторых узлов АС для групповой обработки деталей за счет оптимизации взаимного расположения компонентов узла при фиксированном расположении деталей группы на загрузочной позиции АС.

Ниже описаны алгоритмы решения задач 1.1 (оптимизации размеров оригинальной центральной тумбы стационарного приспособления), 1.2 (выбора оптимального типоразмера литья

унифицированной поворотной шпиндельной коробки), 1.3 (выбора оптимального типоразмера унифицированного крестового стола с набором шпиндельных бабок).

Минимизация размеров (длины  $L_T$  и ширины  $B_T$ ) прямоугольника поверхности центральной тумбы прямоугольного стационарного приспособления (задача 1.1) проводится посредством выбора расположения и размеров прямоугольника тумбы относительно обрабатываемой заготовки в плоскости приспособления так, чтобы края боковых станин и подставок боковых приставок, на которых размещаются силовые столы, обрабатывающие элементы заготовки, не выходили за границы тумбы (рис. 7). Предполагается, что обрабатываемая деталь аппроксимируется прямоугольником, включающим элементы зажимных устройств для ее фиксации на приспособлении.

*Алгоритм оптимизации размеров прямоугольника поверхности оригинальной центральной тумбы стационарного приспособления:*

*Шаг 1.* Задаются исходные размеры прямоугольника поверхности тумбы  $B_T = K_1 B_{дет}$ ,  $L_T = K_2 L_{дет}$ , где  $K_1, K_2 > 1$  – коэффициенты для расчета ширины и длины тумбы, достаточных для размещения детали с учетом зажимных приспособлений на поверхности тумбы. Начало системы координат АС устанавливается в центре прямоугольника поверхности тумбы. Связанная с деталью система координат совмещается с системой координат АС. Формируются боковые приставки, включающие шпиндельные коробки (либо бабки), горизонтальные силовые столы и соответствующие боковые станины.

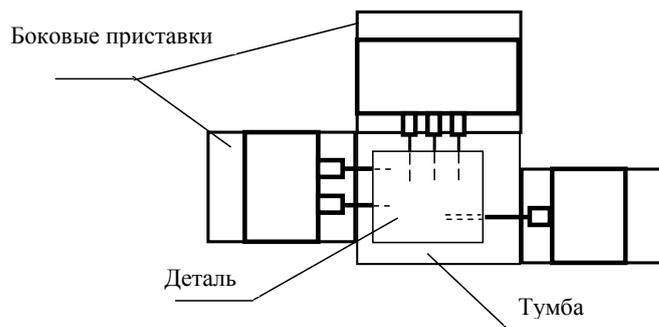


Рис. 7. Оптимальные размеры тумбы стационарного АС для заданных боковых приставок

*Шаг 2.* Если каждая из приставленных боковых станин располагается в границах соответствующей грани тумбы, то переход к шагу 4.

*Шаг 3.* Если какая-либо боковая станина выходит за границы грани тумбы, соответствующий размер тумбы увеличивается на величину, при которой границы станины и тумбы совпадают. С учетом смещения системы координат АС, располагающейся в центре увеличенного прямоугольника поверхности тумбы, корректируются привязка детали и как следствие значения координат всех ее КТЭ. Корректируются также параметры привязки систем координат боковых приставок.

Шаг повторяется, пока все боковые станины не будут расположены в пределах своих граней.

*Шаг 4.* Если какая-либо из граней тумбы не совпадает ни с одной из границ боковых станин, размер этой грани уменьшается на максимальную величину, для которой данное условие еще выполняется. Процедура повторяется, пока каждая граница каждой грани не совпадет с границей по крайней мере одной из боковых станин.

Оптимизация типоразмеров (габаритного диаметра  $D$  и высоты  $H$  прямоугольной части литья) унифицированной поворотной коробки (задача 1.2) осуществляется посредством выбора расположения оси вращения коробки, угла поворота коробки в плоскости вращения в исходной позиции и радиуса коробки (рис. 8). Положение оси коробки выбирается с учетом координат множества центров шпинделей всех блоков коробки, которые соответствуют обрабатываемым отверстиям деталей, размещенных на загрузочной позиции, и с учетом располо-

жения боковой приставки этой коробки относительно грани станины приспособления. Предполагается, что окружность поворотной коробки делится на равные сектора для каждого из ее блоков шпинделей.

Предварительно для каждого шпинделя коробки на основе данных режимов обработки (усилия и частоты вращения шпинделя) определяется диаметр отверстия под шпиндель. Целью выбора расположения центра вращения коробки является минимизация радиуса коробки.



Рис. 8. Определение центра и радиуса поворотной шпиндельной коробки

*Алгоритм оптимизации типоразмера литья поворотной шпиндельной коробки:*

*Шаг 1.* Проверяются ограничения на минимальные расстояния между центрами шпинделей для каждой пары шпинделей каждого блока с использованием таблиц минимальных расстояний, учитывающих диаметры отверстий шпинделей. Если хотя бы для одной пары шпинделей одного блока нарушается такое ограничение, коробка является нереализуемой для заданной структуры технологического процесса. Конец.

*Шаг 2.* Иначе отыскивается эллипс с минимальной малой полуосью, включающий множество точек центров шпинделей всех блоков на позиции обработки в плоскости, перпендикулярной направлению обработки. Эллипс вписывается в сектор круга, расположение центра которого определяется минимальным расстоянием от центра до оси симметрии позиции обработки. Угол  $\alpha$  сектора равен  $360^\circ/n$ , где  $n$  – число блоков шпинделей поворотной коробки. Малая полуось эллипса совпадает с осью симметрии сектора (см. рис. 8). Радиус этого круга определяет минимально возможный габаритный диаметр коробки.

*Шаг 3.* Для каждого шпинделя проверяется ограничение (с использованием соответствующей таблицы для различных диаметров отверстий под шпиндели) на минимальное расстояние между центром шпинделя и центром коробки. При нарушении этого ограничения для какого-либо шпинделя вычисляется необходимое увеличение радиуса круга для ликвидации невязки ограничения.

*Шаг 4.* Последовательно для каждой пары соседних блоков проверяются ограничения на минимальные расстояния между центрами каждой пары шпинделей из разных блоков. При любом нарушении ограничения вычисляется необходимое увеличение радиуса круга для ликвидации невязки ограничения. Ограничение проверяется однократно для каждой пары блоков и каждой пары шпинделей. После того как проверены все ограничения этого типа, предварительные значения координат центра и радиуса коробки найдены.

*Шаг 5.* Определяется угол поворота коробки вокруг ее оси, который позволяет минимизировать высоту прямоугольной части литья коробки, предназначенной для размещения центров шпинделей. Расчетный радиус коробки определяется как максимум среди шпинделей всех

блоков расстояния от центра коробки до границы литья ее прямоугольной части с учетом табличных значений расстояния между центрами шпинделей и краем литья коробки.

*Шаг 6.* Из таблицы типоразмеров поворотных коробок выбирается минимальный габаритный диаметр коробки, превышающий расчетный диаметр. Если расчетный диаметр превышает максимально допустимый габаритный диаметр, то коробка нереализуема. Конец.

Иначе переход к шагу 7.

*Шаг 7.* Проверяется реализуемость компоновочной схемы боковой приставки с выбранным типоразмером поворотной коробки. Подбирается револьверная бабка соответствующего типоразмера, силовой стол и боковая станина. Если боковая станина не выходит за границы грани центральной станины, то поворотная коробка построена. Конец.

*Шаг 8.* Иначе определяется прямоугольная область (см. рис. 8) допустимых для выбранного типоразмера коробки положений ее оси. Если область пуста, то коробка нереализуема для данного ТП. Конец.

*Шаг 9.* Иначе в области выбирается вершина сектора с углом  $\alpha$  и наименьшим радиусом, включающим центры всех шпинделей. Переход к шагу 3.

Алгоритм является сходящимся, поскольку на каждой его итерации расчетный диаметр коробки возрастает.

Оптимизация типоразмеров (задача 1.3) унифицированного крестового стола (длины  $L_{пл}$ , ширины  $B_{пл}$  и хода  $l_{пл} = l_{л} + l_{п}$  платформы, длины  $L_{кар}$ , ширины  $B_{кар}$  и хода  $l_{кар}$  каретки) сводится к минимизации размера платформы стола, величин хода платформы и каретки стола при компактном размещении на ней заданного набора шпиндельных бабок заданных типоразмеров и заданных координат обрабатываемых отверстий и режимов их обработки инструментами (рис. 9). При этом должны выполняться ограничения на взаимное расположение крестового стола и центральной станины с учетом величин баз каждой бабки, размера грани центральной станины для крепления соответствующей боковой приставки, а также кожуха приспособления.

*Алгоритм оптимизации типоразмера крестового стола:*

*Шаг 1.* Бабки упорядочиваются по ширине платформы крестового стола слева направо в порядке возрастания величин разности между координатой арифметического среднего множества центров КТЭ по оси  $Ox$  на загрузочной позиции, обрабатываемых бабкой, и половиной ширины ее привалочной плоскости.

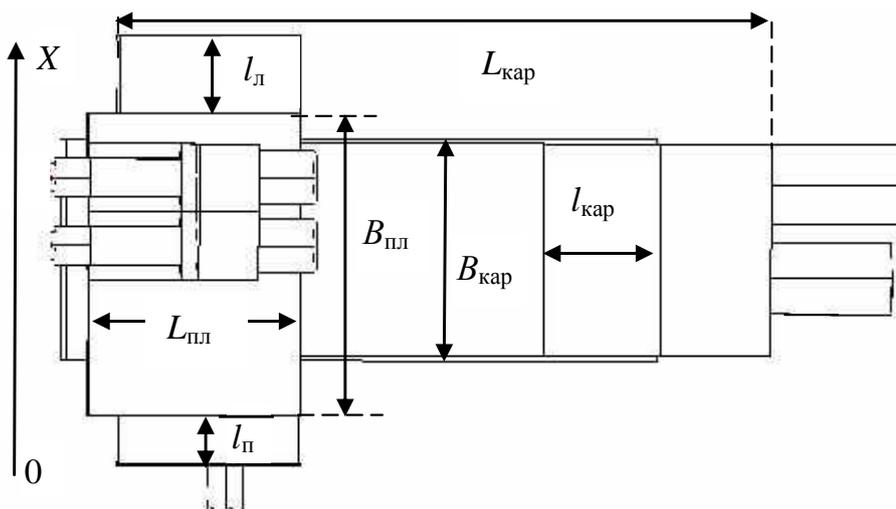


Рис. 9. Упрощенная 3D-модель крестового стола

Определяется расчетная ширина платформы стола как сумма величин ширины привалочных плоскостей бабок, размещенных на платформе.

*Шаг 2.* Определяются значения необходимых перемещений платформы вправо и влево. Расчетная величина хода платформы определяется как сумма этих значений.

*Шаг 3.* Определяется расчетная длина платформы как расстояние между максимальной координатой по оси ординат передних граней бабок и минимальной координатой среди задних граней бабок.

*Шаг 4.* Определяется расчетная длина хода каретки крестового стола как максимум величин длины съема инструментов всех бабок.

*Шаг 5.* С учетом максимальных усилий, величин мощности, крутящих моментов, диапазонов минутных подач бабок, а также расчетных значений ширины, длины и хода платформы, хода каретки выбирается наименьший типоразмер исполнения унифицированного крестового стола, удовлетворяющего этим условиям.

*Шаг 6.* Определяются координаты связанных с каждой бабкой начал систем координат в системе координат станка. Определяются координаты платформы, каретки и салазок крестового стола.

*Шаг 7.* Определяются координаты системы координат боковой станины крестового стола из условия совпадения ее координаты абсцисс с координатой абсцисс крестового стола.

*Шаг 8.* Проверяется условие расположения боковой станины крестового стола в пределах грани центральной станины. При нарушении этого условия проверяется возможность компенсации нарушения за счет разницы между номинальной величиной хода платформы и расчетной величиной ее хода. Если такая разница позволяет, координаты абсцисс платформы, каретки и стола изменяются на требуемую величину для удовлетворения условия. Конец.

В противном случае компоновка крестового стола нереализуема при заданных исходных данных.

*Замечание.* В подсистеме «Компоновка» причины нереализуемости компоновочного решения анализируются и выдаются рекомендации по исправлению ситуации. В частности, в числе таких рекомендаций могут быть изменение расположения деталей на загрузочной позиции и увеличение габарита центральной станины.

#### **4. Алгоритм построения 3D-моделей компоновок АС в графической системе T-Flex**

Как упоминалось ранее, в подсистеме «Компоновка» комплекса «Агрегат» формируются компоновки АС, а построение их 3D-моделей осуществляется на базе СГМ Mechanical Desktop. В процессе развития и дополнения функций программного комплекса выявилось, что данная система ограничивает эти возможности. Поэтому было принято решение заменить ее современной СГМ с более широкими функциональными возможностями, позволяющей при этом решать задачи построения 3D-моделей компоновок АС с наименьшими временными затратами.

Компоновка агрегатного станка в терминологии СГМ является сборочной моделью, или сборкой. Под сборочной 3D-моделью понимается модель, состоящая из других 3D-моделей, хранящихся в отдельных файлах. Новая СГМ должна отвечать следующим требованиям:

- обладать широкими возможностями параметризации;
- хранить геометрию всех моделей узлов станка в файле сборки;
- иметь возможность создания приложений для этой системы.

Не все существующие в настоящее время на рынке СГМ с трехмерной графикой отвечают перечисленным выше требованиям. Анализ возможностей ряда СГМ [22] позволил выбрать систему T-Flex [23], обладающую следующими преимуществами:

– вся информация по проекту (3D-модель, чертеж, база данных, спецификация, интерфейс для управления параметрами модели) хранится в одном файле, что обеспечивает ассоциативность и целостность данных;

– имеются возможности параметризации любых численных или текстовых значений, цветов, слоев, видимости, материалов, состава сборок и т. д., причем между самими параметрами можно задавать разнообразные связи;

– из сборочной модели можно получить геометрические характеристики составляющих ее 3D-моделей, в то время как другие СГМ зачастую хранят только ссылки на содержащие их файлы; также эта особенность дает возможность вставлять в сборочную модель одинаковые 3D-модели, хранящиеся в одном файле, с разными значениями параметров.

Для построения 3D-модели компоновки АС в СГМ T-Flex необходимо сформировать базу параметрических 3D-моделей всех узлов, которые могут входить в состав АС. С одной стороны, эти модели должны быть достаточно детализированы, чтобы отражать основные компоновочные характеристики, а с другой стороны, не должны требовать значительных затрат вычислительных ресурсов на их построение. С учетом данных требований были построены упрощенные 3D-модели узлов (рис. 10). Все размеры в этих моделях являются параметризованными, что позволяет при вставке в сборочную модель изменить их в соответствии с входными данными.

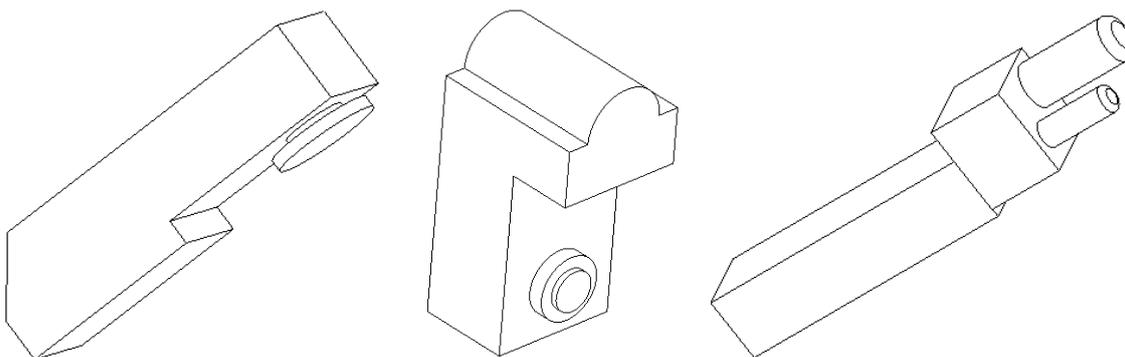


Рис. 10. Примеры упрощенных 3D-моделей узлов станка

После создания базы 3D-моделей узлов АС был разработан алгоритм построения 3D-модели компоновки агрегатного станка с учетом особенностей системы T-Flex. Входными данными для данного алгоритма являются состав оборудования и его основные характеристики:

- наименования узлов АС;
- их геометрические параметры;
- координаты позиционирования начал локальных систем координат (ЛСК) этих узлов относительно глобальной системы координат (ГСК) станка;
- углы поворота ЛСК узлов относительно ГСК станка.

Эти данные формируются в подсистеме «Компоновка» и записываются в файл, который можно использовать отдельно от системы.

#### Алгоритм

*Шаг 1.* В среде T-Flex создается новый документ для построения модели компоновки АС.

*Шаг 2.* Считывается файл с входными данными, полученный из подсистемы «Компоновка».

*Шаг 3.* Для каждого узла из этого файла выполняется следующая последовательность действий:

*Шаг 3.1.* В документе создается локальная система координат (ЛСК), начало координат и направления осей которой соответствуют данным, полученным из файла.

*Шаг 3.2.* В документ вставляется модель узла, и ее ЛСК совмещается с ранее созданной ЛСК.

*Шаг 3.3.* Задаются параметры вставленной модели узла в соответствии с данными, полученными из входного файла.

После завершения работы алгоритма на экран выводится 3D-модель агрегатного станка, состоящая из его основных узлов, список которых отображается в дереве построения модели в левой части экрана (рис. 11).

Приведенный алгоритм реализован на языке программирования C# и скомпонован в динамическую библиотеку DLL, которую можно подключить к T-Flex. При этом у проектировщика остается возможность использовать функции самой системы.

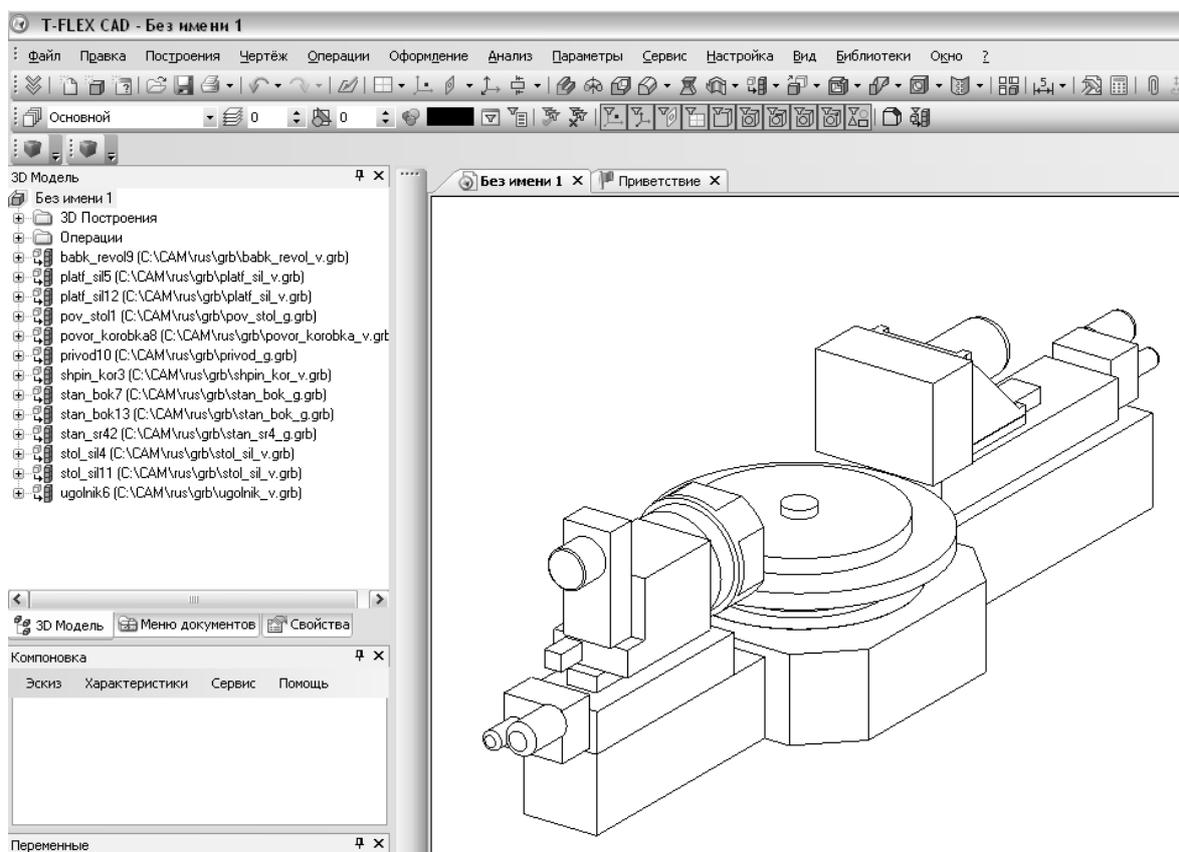


Рис. 11. 3D-модель компоновки АС в среде T-Flex

### Заключение

В работе сформулированы некоторые задачи выбора оптимальных типоразмеров узлов и агрегатного станка в целом для групповой обработки деталей при заданных структуре и параметрах группового технологического процесса, а также заданной структурной схеме его компоновки. Задачи условно разделены на два типа:

- выбора оптимальных типоразмеров узлов за счет более компактного взаимного размещения компонентов узла;

- оптимизации типоразмеров путем выбора размещения деталей на приспособлении.

Описаны реализованные в рамках подсистемы «Компоновка» методика формирования компоновок агрегатных металлорежущих станков для групповой обработки деталей и алгоритмы решения некоторых задач первого типа оптимизации типоразмеров узлов. Приведен также алгоритм формирования 3D-моделей агрегатных станков в среде T-Flex.

Задачи выбора оптимальных типоразмеров узлов и АС в целом путем оптимизации размещения деталей на приспособлении являются сложными в вычислительном отношении. В дальнейшем планируется разработать комплекс методов и программных средств их решения с использованием декомпозиционных подходов, точных методов, эвристических приемов и диалоговых процедур. Такие средства позволят существенно облегчить проектировщику формирование компоновок агрегатных станков для групповой обработки.

Работа была выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект Ф12ФП-001).

### Список литературы

1. Меламед, Г.И. Агрегатные станки / Г.И. Меламед, В.Д. Цветков, Д.С. Айзман. – М. : Машгиз, 1964. – 423 с.

2. Бойцов, В.В. Агрегатные станки и автоматические линии из нормализованных элементов / В.В. Бойцов, В.В. Кузьмин, Ч.Г. Найдов. – М., 1962. – 141 с.
3. Дашенко, А.Н. Проектирование, расчет и исследование основных узлов автоматических линий и агрегатных станков / А.Н. Дашенко, Е.Г. Нахапетян. – М. : Наука, 1964. – 237 с.
4. Гебель, Х. Компоновка агрегатных станков и автоматических линий / Х. Гебель. – М. : Машгиз, 1959. – 189 с.
5. Гусарев, В.С. Новые схемы агрегатных станков для серийного производства / В.С. Гусарев // Изв. вузов. Машиностроение. – 1962. – № 3. – С. 10–18.
6. Горанский, Г.К. Алгоритмизация проектирования типовых компоновок агрегатных станков / Г.К. Горанский, Г.М. Левин, Г.И. Цфасман // Вычислительная техника в машиностроении. – 1967. – Июль. – С. 109 – 121.
7. Горанский, Г.К. Алгоритмизация проектирования компоновочной схемы агрегатного станка с возвратно-поступательным перемещением обрабатываемой детали / Г.К. Горанский, Г.М. Левин, Г.И. Цфасман // Вычислительная техника в машиностроении. – 1967. – Октябрь. – С. 35–41.
8. Феофанов, А.Н. Гибкие автоматические линии в машиностроении / А.Н. Феофанов. – М. : Янус-К, 2002. – 192 с.
9. Технологія автоматизованого машинобудування : підручник / О.В. Якимов [та ін.]. – Одеса : ОНПУ, 2005. – 410 с.
10. Хомяков, В.С. Автоматизированное проектирование компоновок металлообрабатывающих станков / В.С. Хомяков, И.И. Давыдов // Станки и инструмент. – 1990. – № 5. – С. 4–7.
11. Клепиков, С.И. Автоматизация проектирования компоновок металлорежущих станков / С.И. Клепиков, А.Г. Ивахненко, Д.В. Картелев // Станки и инструмент. – 2002. – № 7. – С. 3–4.
12. Врагов, Ю.Д. Анализ компоновок металлорежущих станков: основы компонетики / Ю.Д. Врагов. – М. : Машиностроение, 1978. – 208 с.
13. Аверьянов, О.И. Автоматизированное проектирование компоновок многооперационных станков / О.И. Аверьянов, А.Л. Воронов, Я.М. Гельштейн // Станки и инструмент. – 1982. – № 8. – С. 6–7.
14. Аверьянов, О.И. Модульный принцип построения станков с ЧПУ / О.И. Аверьянов. – М. : Машиностроение, 1987. – 232 с.
15. Комплекс алгоритмов и программных средств формирования компоновок агрегатных металлорежущих станков / Г.М. Левин [и др.]. – Минск, 2005. – 50 с. – (Препринт / ОИПИ НАН Беларуси; № 4).
16. Автоматизация проектирования агрегатных металлорежущих станков : учеб. пособие / Г.М. Левин [и др.]. – Витебск : ВГТУ, 2008. – 122 с.
17. MIP Approach to Design of Rotary Transfer Machines with Turrets / O. Battaia [et al.]. – Saint Etienne, 2013. – 35 p.
18. Халдей, М.Б. Автоматизация синтеза и оценки компоновок станков : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / М.Б. Халдей ; Моск. гос. технол. ун-т. – М., 1996. – 21 с.
19. Хомяков, В.С. Информационная система синтеза компоновок станков / В.С. Хомяков, М.Б. Халдей // Конструкторско-технологическая информатика (КТИ-96) : тр. Междунар. конгресса. – М., 1996 – С. 150–151.
20. Ещенко, Р.А. Повышение эффективности концептуального проектирования металлорежущих станков на основе графического синтеза формообразующих систем : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / Р.А. Ещенко ; Хабар. гос. техн. ун-т. – Комсомольск-на-Амуре, 2001. – 19 с.
21. Mechanical Desktop 6: краткий визуальный курс / К. Стичкомб [и др.] ; пер. с англ. – М. : Вильямс, 2003. – 266 с.
22. Большаков, В.П. 3D-моделирование в AutoCAD, КОМПАС-3D, SolidWorks, Inventor, T-Flex : учебный курс / В.П. Большаков, А.Л. Бочков, А.А. Сергеев. – СПб. : Питер, 2011. – 328 с.

23. Бунаков, П.Ю. Сквозное проектирование в T-Flex : учебное пособие для высших учебных заведений / П. Ю. Бунаков. – М. : ДМК Пресс, 2009. – 394 с.

Поступила 03.10.2014

*Объединенный институт проблем  
информатики НАН Беларуси,  
Минск, Сурганова, 6  
e-mail: rozin@newman.bas-net.by  
victoria.zdanovich@gmail.com*

**B.M. Rozin, V.E. Zdanovich**

**TO THE SYNTHESIS OF A LAYOUT OF MACHINE TOOL  
FOR BATCH PROCESSING**

The problems of choosing the optimal standard size of the basic units and assembly components of machine tools for batch processing of parts are considered. The algorithms for solving some of these problems by optimizing of mutual disposition of unit elements are proposed. The algorithm for constructing 3D-models of machine tool layout elements in the graphics system T-Flex is proposed. The structure and method for implementation of the software for construction and estimation of the machine tool layouts for batch processing are given.

УДК 004.5;621.38

А.А. Бутов

## МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ БУЛЕВОЙ ФОРМУЛЫ МНОГОУГОЛЬНИКА В ДИЗЬЮНКТИВНОЙ НОРМАЛЬНОЙ ФОРМЕ

*Дорабатывается метод нахождения булевой формулы многоугольника в дизъюнктивной нормальной форме, изложенный в работе [1]. Усовершенствованный метод устраняет недостаток, связанный с существованием класса задач, для которых решение находится лишь приближенно, и всегда позволяет находить точное решение. Метод может быть использован, в частности, в системах автоматизированного проектирования топологии интегральных схем.*

### Введение

Для описания геометрических объектов (например, в системах автоматизированного проектирования топологии интегральных схем [2, 3]) обычно используются методы аналитической геометрии, векторной алгебры, теории матриц [2–6].

Альтернативные способы описания, появившиеся в последнее время, основаны на использовании булевых формул в скобочной [7] и в дизъюнктивной нормальной [1, 8, 9] формах. В частности, простой и приемлемый на практике метод нахождения дизъюнктивной нормальной формы (ДНФ), описывающий прямоугольник, изложен в работе [9]. Однако недостаток этого метода заключается в том, что в найденную им формулу наряду с предикатными переменными, которые связаны с полуплоскостями, порождаемыми сторонами многоугольника, входят еще и дополнительные предикатные переменные, а также инверсии некоторых из них. Метод, предлагаемый в работе [1], свободен от указанного недостатка и удобен с точки зрения практической реализации. Вместе с тем существует класс задач, для которых решение находится лишь приближенно. Усовершенствованный метод, описываемый в данной работе, всегда позволяет находить точное решение. Это означает, что для любой задачи элементы решения, интерпретируемые как выпуклые компоненты, будут покрывать в совокупности всю область плоскости, занимаемую многоугольником.

### 1. Основные определения, постановка задачи

Многоугольник на плоскости задается своей границей – замкнутой непересекающейся ломаной линией, состоящей из отрезков прямых или сторон многоугольника. Эту границу можно определить последовательностью угловых точек или вершин многоугольника  $p_1, p_2, \dots, p_n$ , получаемых при последовательном обходе его вдоль границы (рис. 1).

Так как каждая пара соседних угловых точек ограничивает соответствующую сторону многоугольника, его границу можно задать также последовательностью сторон многоугольника:  $s_1, s_2, \dots, s_n$ , где  $s_1 = (p_1, p_2)$ ,  $s_2 = (p_2, p_3)$ ,  $\dots$ ,  $s_n = (p_n, p_1)$ .

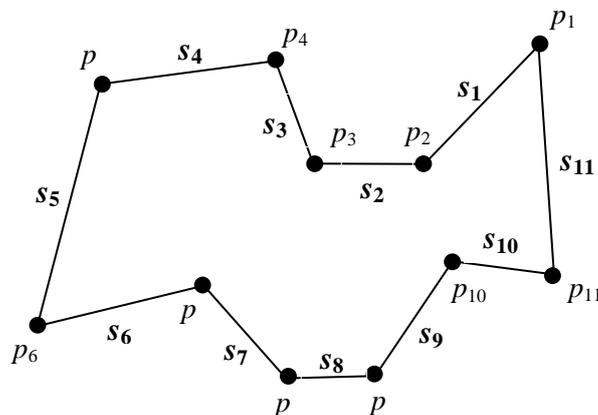


Рис. 1. Вершины и стороны многоугольника,  $n = 11$

Вершина  $p_1$ , которая служит начальной угловой точкой для последовательного обозначения отрезков, образующих границу многоугольника, называется начальной. В качестве начальной будем выбирать вершину, наиболее удаленную от начала координат.

Каждой стороне  $s_i$  многоугольника поставим в соответствие ориентированную прямую  $v_i$ , содержащую точки  $p_i$  и  $p_{i+1}$ . Будем считать, что она ориентирована от  $p_i$  к  $p_{i+1}$ .

Рассмотрим некоторую произвольную точку плоскости  $p$ , заданную парой декартовых координат  $(x, y)$ . Будем считать, что точка  $p$  расположена слева от прямой  $v_i$ , если она принадлежит полуплоскости, расположенной слева от ориентированной прямой  $v_i$ , или лежит на прямой  $v_i$ . Все возможные варианты левостороннего расположения точки  $p$  относительно ориентированной прямой  $v_i$  показаны на рис. 2 (последние два варианта соответствуют случаю, когда прямая  $v_i$  параллельна координатной оси  $X$ ).

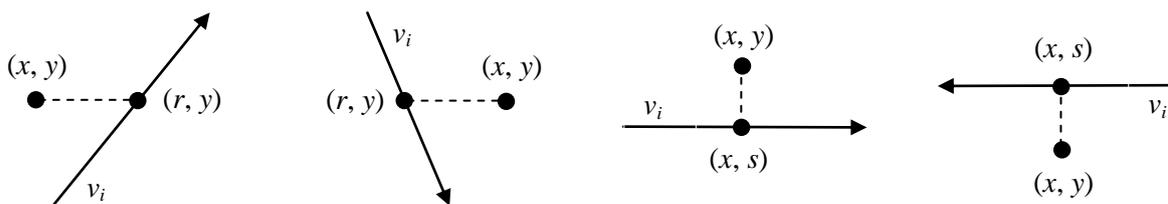


Рис. 2. Варианты левостороннего расположения точки относительно ориентированной прямой

Как и в работе [7], будем обозначать отрезки ломаной буквами  $a, b, c, \dots$ , границу многоугольника  $abc\dots$ , а полуплоскости, расположенные слева от соответствующих ориентированных прямых, – буквами  $A, B, C, \dots$  (считая, что каждая из этих полуплоскостей включает в себя еще и все точки порождающей ее ориентированной прямой). Введем также предикаты  $a, b, c, \dots$  для описания положения некоторой точки  $p$  на плоскости, полагая, что  $a(p) = 1$ , если и только если  $p \in A$ .

Используя такие предикатные переменные, в работе [7] описан метод построения скобочной булевой формулы  $F$ , представляющей многоугольник и обладающей следующим свойством: если выполнить подстановку предикатных координат произвольной точки плоскости, то формула  $F$  примет значение 1 в случае, когда точка принадлежит данному многоугольнику, и значение 0 в противном случае.

Аналогичная задача решается и в работах [1, 8, 9], однако булева формула  $F$  там строится в ДНФ.

Целью настоящей работы является доработка метода нахождения булевой формулы многоугольника в ДНФ, изложенного в работе [1]. Усовершенствованный метод позволяет устранить недостаток, связанный с невозможностью всегда находить точное решение рассматриваемой задачи.

## 2. Выпуклые и вогнутые углы многоугольника

Рассмотрим пару соседних сторон, задающую некоторый угол многоугольника. Если этот угол меньше  $180^\circ$ , будем называть его выпуклым, иначе – вогнутым. Например, на рис. 1 угол, образованный сторонами  $s_1$  и  $s_2$ , будет вогнутым, а сторонами  $s_3$  и  $s_4$  – выпуклым.

Пара ориентированных прямых, соответствующих соседним сторонам  $a$  и  $b$  многоугольника, ограничивает участок плоскости, который можно представить формулой  $A \cap B$ , если стороны образуют выпуклый угол, и формулой  $A \cup B$ , если вогнутый угол.

Если все углы многоугольника будут выпуклыми, то такой многоугольник называется выпуклым. Например, выпуклый многоугольник с границей  $abcde$  будет занимать участок плоскости  $A \cap B \cap C \cap D \cap E$ , а его булева формула будет иметь вид  $F = abcde$ .

Каждой стороне многоугольника припишем ранг, равный числу тех смежных с ней углов, которые являются вогнутыми.

### 3. Элементы покрытия, порожденные сторонами многоугольника

Будем говорить, что многоугольник  $M^*$  является элементом покрытия многоугольника  $M$ , если все точки плоскости, которые принадлежат многоугольнику  $M^*$ , принадлежат также и многоугольнику  $M$ . Кроме того, будем говорить, что многоугольник  $M$  поглощает любой свой элемент покрытия  $M^*$ .

Опишем способ нахождения элементов покрытия многоугольника  $M$ , основанный на последовательном анализе его сторон. Сначала будем рассматривать те стороны многоугольника, которые ограничены с обеих сторон выпуклыми углами, т. е. имеют ранг 0. Такой стороной в многоугольнике  $M$  (рис. 3) является, например, сторона  $a$ .

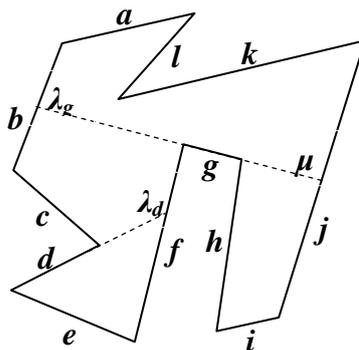


Рис. 3. Многоугольник  $M$

Начиная со стороны  $a$ , выполняем обход границы многоугольника  $M$  в прямом направлении (т. е. в направлении, задаваемом ориентированными прямыми, соответствующими сторонам многоугольника), придерживаясь следующих правил:

1. Если при обходе встречается выпуклый угол, выполняется переход по этому углу на очередную сторону многоугольника.
2. Если встречается вогнутый угол, текущая сторона продлевается дальше до первого пересечения с другой стороной многоугольника, после чего выполняется переход на эту сторону и движение по ней в прямом направлении.

Такой процесс обхода продолжается до тех пор, пока мы не окажемся на стороне многоугольника, которая уже была пройдена раньше. В результате граница обхода будет представлять собой контур или включать в себя контур. Так как направление движения изменялось только выпуклыми углами, то фигура, ограниченная найденным контуром, будет представлять собой выпуклый многоугольник и являться элементом покрытия многоугольника  $M$ .

На рис. 3 для стороны  $a$  граница обхода будет  $abc^+f^+k^+$  (индексом «+» помечена удлиненная сторона многоугольника, индексом «±» – сторона, которая продлена с одной стороны и укорочена с другой). Найденный при этом контур задает элемент покрытия  $C_1$ , который имеет границу  $b^-c^+f^+k^+$  (индексом «-» помечена укороченная сторона многоугольника) и выделен серым цветом на рис. 4, а.

Обход границы при поиске элементов покрытия можно вести не только в прямом, но и в обратном направлении (т. е. в направлении, противоположном тому, которое задается ориентированными прямыми, соответствующими сторонам многоугольника). Например, сторона  $a$  при обходе в обратном направлении порождает элемент покрытия  $C_2$  (рис. 4, б) с границей  $al^+c^-b^-$ .

Теперь рассмотрим способ порождения элементов покрытия теми сторонами многоугольника, которые ограничены с одной стороны выпуклым, а с другой стороны вогнутым углами, т. е. имеют ранг 1. В этом случае необходимо придерживаться следующих правил:

1. Если обход границы должен начинаться со стороны выпуклого угла, способ порождения элемента покрытия остается тем же, что был описан выше. Например, сторона  $c$  будет порождать элемент покрытия  $C_1$  с границей  $c^+f^+k^+b^-$ .

2. Если обход границы должен начинаться со стороны вогнутого угла, сначала нужно продлить рассматриваемую сторону многоугольника в направлении от вогнутого угла и найти первую точку пересечения с другой стороной многоугольника. Именно от этой точки пересечения и необходимо начинать обход границы. Например, сторону  $d$  многоугольника (см. рис. 3) нужно сначала продлить до пересечения со стороной  $f$  в точке  $\lambda_d$ , после чего, начиная с этой точки, выполнить обход по границе  $d^+ef^-$ . В результате будет найден элемент покрытия  $C_3$  (рис. 4, б).

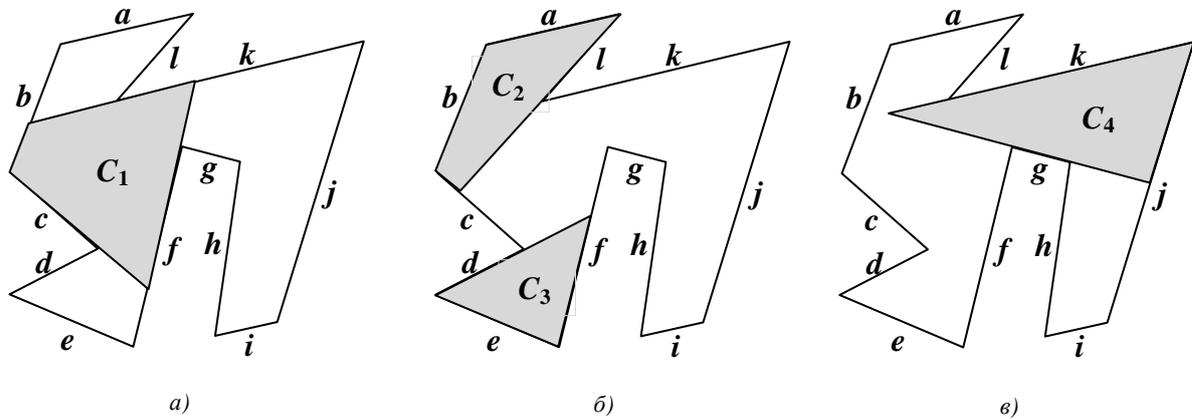


Рис. 4. Элементы покрытия: а)  $C_1$ ; б)  $C_2$  и  $C_3$ ; в)  $C_4$

Перейдем к рассмотрению способа порождения элементов покрытия теми сторонами многоугольника, которые ограничены с обеих сторон вогнутыми углами, т. е. имеют ранг 2. В многоугольнике  $M$  единственной такой стороной является сторона  $g$ . Эту сторону нужно предварительно продлить в обоих направлениях до первого пересечения с другими сторонами многоугольника (соответствующие точки пересечения  $\lambda_g$  и  $\mu_g$  показаны на рис. 3). С одной из этих точек (в прямом направлении с точки  $\lambda_g$ , в обратном направлении – с точки  $\mu_g$ ) и необходимо начинать обход границы при поиске элементов покрытия.

Таким образом, сторона  $g$  порождает элемент покрытия  $C_4$  (рис. 4, в) с границей  $g^+j^-k^+$  и началом обхода в точке  $\lambda_g$  и элемент покрытия  $C_5$  (рис. 5) с границей  $g^-b^+a^+$  (индексом « $\sim$ » помечен отрезок прямой, лежащий на линии, которая является продолжением стороны многоугольника) и началом обхода в точке  $\mu_g$ .

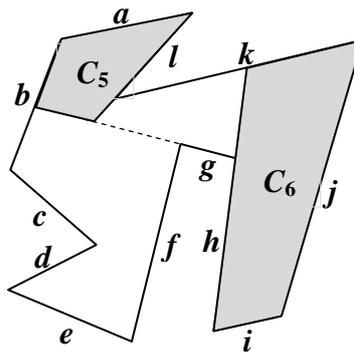


Рис. 5. Элементы покрытия  $C_5$  и  $C_6$

#### 4. Базовый метод нахождения элементов покрытия многоугольника

В работах [7, 8] показано, что булеву формулу любого многоугольника можно представить в ДНФ, которая соответствует покрытию многоугольника его выпуклыми компонентами.

В работе [1] предложен метод покрытия многоугольника выпуклыми компонентами, который далее будем называть базовым. Его суть заключается в следующем:

1) последовательно перебираются все стороны  $s_1, s_2, \dots, s_n$  многоугольника  $M$ , в результате чего находятся все порождаемые ими элементы покрытия, которые в совокупности образуют множество  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_p\}$ ;

2) просматриваются элементы множества  $C$ , и если очередной элемент поглощается каким-либо другим элементом этого же множества, то он удаляется.

После этого все оставшиеся элементы множества  $C$  заменяются представляющими их конъюнкциями соответствующих предикатных переменных. Тогда дизъюнкция этих конъюнкций и даст искомую булеву формулу многоугольника в ДНФ.

Базовый метод нахождения элементов покрытия проиллюстрируем на примере многоугольника  $M$ , изображенного на рис. 3.

Если обход границы вести в прямом направлении, то сторона  $a$ , как было показано выше, порождает элемент покрытия  $C_1$  с границей  $b^-c^+f^+k^+$ . Этот же элемент покрытия порождает стороны  $b, c, e, f, i, j$ . Сторона  $d$  порождает элемент покрытия  $C_3$  с границей  $d^+ef^-$ , а сторона  $g$  – элемент покрытия  $C_4$  с границей  $g^+j^-k^+$ . Сторона  $h$  порождает элемент покрытия  $C_6$  с границей  $h^+ijk^-$ , а сторона  $l$  – элемент покрытия  $C_2$  с границей  $l^+abc^-$ .

Если обход границы вести в обратном направлении, то сторона  $a$  порождает элемент покрытия  $C_2$  с границей  $al^+c^-b$ . Этот же элемент покрытия порождает стороны  $b, c, l$ . Сторона  $d$  порождает элемент покрытия  $C_3$  с границей  $d^+f^-e$ . Этот же элемент покрытия порождает стороны  $e$  и  $f$ . Сторона  $g$  порождает элемент покрытия  $C_5$  с границей  $g^-b^-al^+$ . Сторона  $h$  порождает элемент покрытия  $C_6$  с границей  $h^+k^-ji$ . Этот же элемент покрытия порождает стороны  $i$  и  $j$ .

Таким образом будет найдено множество  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_6\}$ , содержащее все возможные элементы покрытия, порождаемые сторонами многоугольника  $M$ . Так как элемент  $C_5$  поглощается элементом  $C_2$ , то он удаляется из множества  $C$ .

В результате булева формула многоугольника  $M$  в ДНФ будет иметь следующий вид:

$$F = bcfk \vee alcb \vee def \vee gjk \vee hijk.$$

### 5. Усовершенствованный метод нахождения булевой формулы многоугольника

Как было сказано выше, базовый метод нахождения элементов покрытия не всегда приводит к получению точного решения для рассматриваемой задачи. Применив его, например, к многоугольнику, показанному на рис. 1, получим точное решение. Однако, чуть видоизменив этот многоугольник путем увеличения длины стороны  $s_2$  (рис. 6), получим уже приближенное решение (непокрытый выпуклыми компонентами остаток показан на рис. 6 серым цветом).

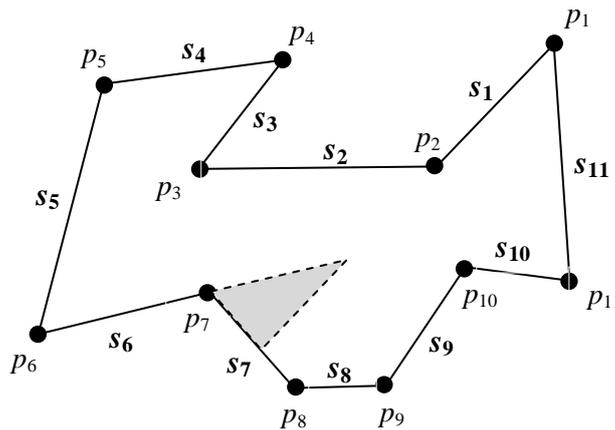


Рис. 6. Многоугольник с непокрытым остатком

Эмпирически было установлено следующее:

– базовый метод нахождения элементов покрытия многоугольника всегда позволяет получить точное решение, если граница многоугольника не содержит сторон ранга 2 (т. е. сторон, у которых оба смежных угла являются вогнутыми);

– если в результате продления стороны ранга 2 до первого пересечения с другой стороной многоугольника будет отсекаться выпуклый многоугольник, то любая точка этого многоуголь-

ника не будет принадлежать непокрытому остатку, полученному после применения базового метода.

Эти факты позволяют усовершенствовать базовый метод нахождения элементов покрытия так, что для любого многоугольника будет найдено точное решение. Общая схема усовершенствованного метода с использованием базовых инструкций программирования имеет следующий вид:

### begin BoolFormula

$C \leftarrow \text{BaseMethod}(M)$

(находится множество  $C$  элементов покрытия многоугольника  $M$  путем применения базового метода. Можно сократить перебор, если не рассматривать стороны нулевого ранга, так как они не дают никаких новых элементов покрытия в сравнении с элементами покрытия, порождаемыми сторонами ранга 1 или 2)

**if** ( $\exists s' (s' \in \text{boundary}(M) \wedge \text{rank}(s') = 2)$ ) **then**

(если  $M$  содержит хотя бы одну сторону ранга 2)

$M^\pi \leftarrow \{M\}$

( $M^\pi$  – вспомогательное множество, элементы которого есть многоугольники)

**while**( $\exists M' (M' \in M^\pi \wedge (\exists s' (s' \in \text{boundary}(M') \wedge \text{rank}(s') = 2)))$ )

(повторять, пока в  $M^\pi$  можно найти элемент, имеющий хотя бы одну сторону ранга 2)

**expand** ( $M^\pi, M'$ )

(входящий в  $M^\pi$  многоугольник  $M'$  заменяется двумя смежными (имеющими общий отрезок внутри своих границ) компонентами, получаемыми путем разбиения  $M'$  на две части. Для этого сторону ранга 2 достаточно продлить в прямом или в обратном направлении до первого пересечения с другой стороной многоугольника. Если сторон ранга 2 несколько, например  $m$ , то из  $2 \times m$  вариантов продления выбирается тот, который позволяет отсечь выпуклый многоугольник. Если такой вариант отсутствует, то выбирается вариант, позволяющий преобразовать большее число сторон ранга 2 в стороны ранга 1)

**end while**

**reduce** ( $M^\pi$ )

(из множества  $M^\pi$  удаляются все те элементы, которые представляют собой выпуклые многоугольники)

$C^* \leftarrow \emptyset$

**for each**  $M' \in M^\pi$

(повторять для каждого элемента из множества  $M^\pi$ )

$C' \leftarrow \text{BaseMethod}(M')$

(находится множество  $C'$  элементов покрытия многоугольника  $M'$  путем применения базового метода)

**for each**  $c' \in C'$

(повторять для каждого элемента из множества  $C'$ )

**if** ( $\forall c (c \in C \wedge (\text{region}(c) \cup \text{region}(c') \neq \text{region}(c)))$ )

(если  $c'$  не поглощается ни одним элементом из множества  $C$ )

$C^* = C^* \cup \{c'\}$

**end if**

**end for**

**end for**

$C = C \cup C^*$

**end if**

$F \leftarrow \text{generation}(C)$

(все элементы множества  $C$  заменяются представляющими их конъюнкциями соответствующих предикатных переменных. Дизъюнкция этих конъюнкций и будет представлять собой искомую булеву формулу  $F$  многоугольника в ДНФ)

### end BoolFormula

Изложенный метод проиллюстрируем на примере многоугольника  $M$ , изображенного на рис. 6. Упростим этот рисунок, убрав метки вершин многоугольника и дав новые обозначения его сторонам (рис. 7).

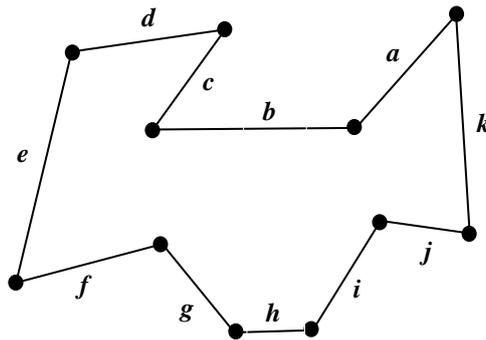


Рис. 7. Упрощенный вид многоугольника  $M$

Применив к многоугольнику  $M$  базовый метод, находим множество  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_5\}$  его элементов покрытия с границами  $a^+g^-hi^+k^-$ ,  $b^+e^-f^+k^-$ ,  $c^+def^-$ ,  $j^+ka^+$ ,  $b^+k^-j^+e^-$  соответственно.

Так как многоугольник  $M$  содержит всего одну сторону с рангом 2, то имеются только два варианта его замены смежными компонентами  $M^1$  и  $M^2$ . Эти варианты (рис. 8) равноценны, поскольку оба отсекают выпуклые компоненты и преобразуют сторону ранга 2 в сторону ранга 1.

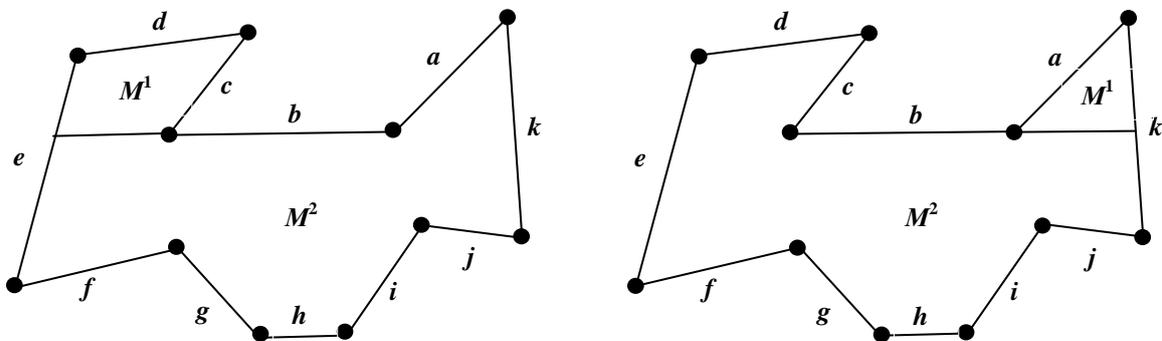


Рис. 8. Два варианта замены многоугольника  $M$  компонентами  $M^1$  и  $M^2$

Рассмотрим, например, вариант 2. Исключив из рассмотрения выпуклый многоугольник  $M^1$ , применим базовый метод к многоугольнику  $M^2$  и найдем множество  $C^2$ , содержащее элементы покрытия  $M^2$ .

Последовательно перебираем элементы, входящие в множество  $C^2$ , и для каждого из них проверяем, поглощается ли этот элемент каким-либо элементом множества  $C$ . В результате оказывается, что только один элемент покрытия, имеющий границу  $g^+hi^+b^+$ , не поглощается ни одним элементом множества  $C$  и поэтому будет помещен во вспомогательное множество  $C^*$ , а затем и в множество  $C$ . В итоге искомая булева формула многоугольника  $M$  в ДНФ будет иметь следующий вид:

$$F = aghik \vee befk \vee cdef \vee jka \vee bkje \vee ghib.$$

### Заключение

В статье представлена доработка метода нахождения булевой формулы многоугольника в ДНФ, изложенного в работе [1]. Усовершенствованный метод устраняет недостаток, связанный с существованием класса задач, для которых решение находится лишь приближенно.

Необходимо отметить, что направление исследований, связанное с представлением многоугольников булевыми формулами, открывает новые возможности для решения широкого круга оптимизационных задач, например в области топологического проектирования интегральных схем, путем использования развитого аппарата булевой алгебры.

**Список литературы**

1. Бутов, А.А. Метод нахождения булевой формулы многоугольника в дизъюнктивной нормальной форме без использования дополнительных предикатных переменных / А.А. Бутов // Вестник Брестского государственного технического университета. Физика, математика, информатика. – 2012. – № 5. – С. 48–51.
2. Автоматизированная система подготовки информации для формирования фотошаблонов / Е.А. Шестаков [и др.] // Искусственный интеллект. – 2008. – № 4. – С. 200–207.
3. Фейнберг, В.З. Геометрические задачи машинной графики больших интегральных схем / В.З. Фейнберг. – М. : Радио и связь, 1987. – 178 с.
4. Ласло, М. Вычислительная геометрия и компьютерная графика на C++ / М. Ласло. – М. : БИНОМ, 1997. – 304 с.
5. Препарата, Ф. Вычислительная геометрия : введение / Ф. Препарата, М. Шеймос. – М. : Мир, 1989. – 478 с.
6. Никулин, Е.А. Компьютерная геометрия и алгоритмы машинной графики / Е.А. Никулин. – СПб. : БКХ-Петербург, 2005. – 576 с.
7. Закревский, А.Д. Канонические булевы формулы многоугольников / А.Д. Закревский // Информатика. – 2009. – № 2. – С. 93–101.
8. Поттосин, Ю.В. Использование булевых функций для представления многоугольников / Ю.В. Поттосин, Е.А. Шестаков // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2008. – № 2 (3). – С. 106–115.
9. Бутов, А.А. Простой метод нахождения булевой формулы многоугольника в дизъюнктивной нормальной форме / А.А. Бутов // Вестник Брестского государственного технического университета. Физика, математика, информатика. – 2011. – № 5. – С. 35–38.

Поступила 30.10.2014 г.

*Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники,  
Минск, ул. П. Бровки, 6  
e-mail: alx.butov@gmail.com*

**A.A. Butov**

**THE METHOD OF CONSTRUCTING A BOOLEAN FORMULA OF A POLYGON  
IN THE DISJUNCTIVE NORMAL FORM**

The paper focuses on finalizing the method of finding a polygon Boolean formula in disjunctive normal form, described in the previous article [1]. An improved method eliminates the drawback associated with the existence of a class of problems for which the solution is only approximate. The proposed method always allows to find an exact solution. The method can be used, in particular, in the systems of computer-aided design of integrated circuits topology.

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

1. Статьи принимаются в редакцию через электронную систему подачи по адресу <http://jinfo.bas-net.by> в формате файлов текстовых редакторов Microsoft Word 97 и Word 2000 для Windows. Основной текст статьи набирается с переносами шрифтом Times New Roman 11 пт, интервал между строками – одинарный, абзацный отступ 1 см, поля по 2,5 см со всех сторон.

2. Объем статьи не должен превышать 12 страниц (включая таблицы, иллюстрации, список литературы), количество иллюстраций – не больше пяти. Допускаются краткие сообщения до трех страниц.

3. Статья должна иметь индекс УДК (универсальная десятичная классификация).

4. Название статьи, фамилии всех авторов и аннотация должны быть переведены на английский язык. Для каждого из авторов приводится развернутое название учреждения с полным почтовым адресом, а также номер телефона и электронный адрес (e-mail) для связи с редакцией.

5. Формулы, иллюстрации, таблицы, встречающиеся в статье, должны быть пронумерованы в соответствии с порядком цитирования в тексте. Ссылки на рисунки и таблицы в тексте обязательны. Необходимо избегать повторения одних и тех же данных в таблицах, графиках и тексте статьи.

Рисунки должны быть выполнены с хорошим разрешением в масштабе, позволяющем четко различать надписи и обозначения. Подрисовочные подписи с расшифровкой всех позиций, представленных на рисунке, набираются шрифтом гарнитуры основного текста, размер символов 9 пт. Цветные иллюстрации печатаются только в том случае, когда это необходимо для понимания излагаемого материала.

6. Набор формул выполняется в формульных редакторах Microsoft Equation или Math Type и должен быть единообразным по применению шрифтов и знаков по всей статье.

Прямо ( ) набираются: греческие и русские буквы; математические символы ( $\sin$ ,  $\lg$ ,  $\infty$ ); символы химических элементов (C, Cl,  $\text{CHCl}_3$ ); цифры (римские и арабские); векторы; индексы (верхние и нижние), являющиеся сокращениями слов.

Курсивом (~) набираются: латинские буквы – переменные, символы физических величин (в том числе и в индексе).

7. Сокращения в тексте статьи (за исключением единиц измерения) могут быть использованы только после упоминания полного термина. Единицы измерения физических величин следует приводить в Международной системе СИ.

8. Литература приводится автором общим списком в конце статьи. Ссылки на литературу в тексте идут по порядку и обозначаются цифрой в квадратных скобках. Ссылаться на неопубликованные работы не допускается. С примерами оформления библиографического описания в списке литературы можно ознакомиться в приложении 2 к *Инструкции по оформлению диссертации, автореферата и публикаций по теме диссертации* на сайте Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь <http://vak.org.by>.

9. Поступившие в редакцию статьи направляются на рецензирование специалистам. Основным критерием целесообразности публикации является новизна и информативность статьи. Если по рекомендациям рецензента статья возвращается автору на доработку, а переработанная рукопись вновь рассматривается редколлегией, датой поступления считается день получения редакцией ее окончательного варианта. Статьи не по профилю журнала возвращаются авторам после заключения редколлегии.

10. Статьи, направляемые на доработку, должны быть возвращены в исправленном виде с ответами на все вопросы.

11. Редакция журнала предоставляет возможность первоочередного опубликования статей, представленных лицами, которые осуществляют послеузовское обучение (аспирантура, докторантура, соискательство) в год завершения обучения.

12. Авторы несут ответственность за направление в редакцию статей, уже опубликованных ранее, или статей, принятых к публикации другими изданиями.

13. Редакция оставляет за собой право на редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

***Журнал «Информатика» включен Высшей аттестационной комиссией Республики Беларусь в список научных изданий для опубликования результатов диссертационных исследований.***

## **Индексы**

**00827**

для индивидуальных  
подписчиков

**008272**

для предприятий и  
организаций