

ISSN 1816-0301

# ИНФОРМАТИКА

3(55)

ИЮЛЬ-СЕНТЯБРЬ  
2017

## **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, С.Я. Килин, В.В. Краснопрошин, А.М. Крот, С.В. Кругликов,  
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>

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ИНФОРМАТИКИ  
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

---

---

# ИНФОРМАТИКА

---

---

ЕЖЕКВАРТАЛЬНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

*Издается с января 2004 г.*

---

---

№ 3(55) • июль-сентябрь 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

- Ерофеев В.Т.** Моделирование распространения электромагнитных волн в средах с пространственной дисперсией .....5
- Клименок В.И.** Стационарное распределение тандемной системы массового обслуживания с дополнительными потоками на станциях .....13
- Сюльжин И.Н., Бильчинская С.Г., Чернявский Ю.А., Шабинская Е.В.**  
Регрессионный анализ потребительских расходов на питание в домохозяйствах региона как функции располагаемого личного дохода и цены .....23

### ПРИКЛАДНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Стрижнев А.Г.** Способ автоматического подъема и горизонтирования опорной платформы .....32
- Кончак В.С., Хитриков С.В., Швец Д.А., Богданов Я.А., Николаев Ю.И., Ефремов В.Л.** Исследование демпфирующих свойств модели адаптивного амортизатора .....40
- Сытова С.Н., Дунец А.П., Коваленко А.Н., Мазаник А.Л., Сидорович Т.П., Черепица С.В.** Информационная система eLab для аккредитованных испытательных лабораторий .....49

## ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ, ИЗОБРАЖЕНИЙ И РЕЧИ

<b>Артемьев В.М., Наумов А.О., Кохан Л.Л.</b> Фильтрация сигналов при внезапных отказах датчиков на основе рекуррентного подхода наименьших квадратов.....	62
<b>Житко В.А., Лобанов Б.М.</b> Прикладные системы с речевым интерфейсом.....	72
<b>Васильков Д.М.</b> Оценка геометрических параметров тела человека на основе данных сканирования с помощью сенсора Microsoft Kinect.....	82

## ЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

<b>Поттосин Ю.В.</b> Метод многоблочной параллельной декомпозиции системы частичных булевых функций .....	92
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

## УЧЕНЫЕ БЕЛАРУСИ

<b>Сергей Владимирович Кругликов</b> (к 50-летию со дня рождения).....	99
<b>Правила для авторов</b> .....	101

---

Редактор Г.Б. Гончаренко  
Корректор А.А. Михайлова  
Компьютерная верстка О.Б. Бутевич

---

Сдано в набор 01.08.2017. Подписано в печать 15.09.2017.  
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Ризография.  
Усл. печ. л. 11,8. Уч.-изд. л. 11,6. Тираж 60 экз. Заказ 6.

---

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*

---

---

№ 3(55) • Jule-September 2017

## CONTENTS

### MATHEMATICAL MODELING

- Erofeenko V.T.** Modeling of electromagnetic waves propagation in the medium with space dispersion .....5
- Klimenok V.I.** Stationary distribution of a tandem queue with additional flows on the stations of the tandem .....13
- Siulzhyn I.N., Bilchinskaya S.G., Chernyavskiy Yu.A., Shabinskaya E.V.** Regressional analysis of consumer nutrition spendings in the households of the region as function of personal income and price .....23

### APPLIED INFORMATION TECHNOLOGIES

- Stryzhniou A.G.** Method for automatic raising and leveling of support platform .....32
- Konchak V.S., Hitrikov S.V., Shvets D.A., Bahdanau Y.A., Nikolaev J.I., Efremov V.L.** The technique of research of the dempping properties of the adaptive amortizor with the controlling throttle .....40
- Sytova S.N., Dunets A.P., Kovalenko A.N., Mazanik A.L., Sidorovich T.P., Charapitsa S.V.** Information system eLab for accredited testing laboratories .....49

## SIGNAL, IMAGE AND SPEECH PROCESSING

<b>Artemiev V.M., Naumov A.O., Kokhan L.L.</b> Signal filtering for sudden sensor failures based on recurrent least squares method .....	62
<b>Zhitko V.A., Lobanov B.M.</b> Some examples of applied systems with speech interface .....	72
<b>Vasilkov D.M.</b> Estimation of human body shape parameters using Microsoft Kinectsensor.....	82

## LOGICAL DESIGN

<b>Pottosin Yu.V.</b> A method for multi-block parallel decomposition of a system of partial boolean functions .....	92
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

## SCIENTISTS OF BELARUS

<b>Sergey Vladimirovich Kruglikov</b> (on his 50 <sup>th</sup> birthday) .....	99
<b>Rules for the authors</b> .....	101

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 517.958:537.8

В.Т. Ерофеев

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В СРЕДАХ С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ДИСПЕРСИЕЙ

*Разрабатывается математическая модель, описывающая распространение электромагнитных волн в среде с пространственной дисперсией. Моделирование основано на преобразовании интегро-дифференциальных уравнений монохроматической электродинамики для полей в среде с пространственной дисперсией к дифференциальной модели с уравнениями в частных производных второго порядка. В рамках разработанной модели аналитически строится полная система базисных плоских электромагнитных полей, распространяющихся в однородной среде с пространственной дисперсией.*

**Введение**

Разработка математических методов моделирования процессов взаимодействия электромагнитных волн с композитными материалами является актуальным направлением исследований в математической физике [1]. Как правило, композиты представляют собой матрицы, содержащие материальные неоднородности (частицы) различных типов и отличающиеся большим разнообразием [2–4]. Это обуславливает применение различных математических подходов, адекватно описывающих электрические и магнитные свойства материалов [5–8]. Следует отметить, что существенную роль в моделях играют отношения между размерами частиц и длинами волн – в вакууме, в матрице и материале неоднородностей.

Одним из классов композитных материалов являются среды с пространственной и временной дисперсиями [9–11]. Для них электромагнитные свойства в точке зависят от значений напряженностей электрического и магнитного полей в окрестности рассматриваемой пространственно-временной точки. В этом случае электрическая и магнитная поляризации среды выражаются через интегральные операторы [1, 12]. Аналитическое решение уравнений Максвелла с интегральными членами затруднительно. Поэтому строятся упрощенные модели сред, которые позволяют исследовать уравнения и получать их аналитические решения.

В настоящей статье в случае композитов с размерами частиц, значительно меньшими длины электромагнитной волны, распространяющейся в среде, поля представлены в виде разложений Тейлора. В разрабатываемой модели использовано конечное число слагаемых рядов и опущены относительно малые члены бесконечных рядов. В результате интегро-дифференциальные уравнения Максвелла преобразованы к системе уравнений Максвелла, содержащих дифференциальные операторы второго порядка. Для полученных уравнений построены аналитические решения в виде плоских электромагнитных полей, распространяющихся в среде.

**1. Интегро-дифференциальная модель среды**

Рассмотрим пространство  $R^3$  с декартовой системой координат  $Oxyz$ , заполненное материальной средой с пространственной дисперсией [1]. Комплексные амплитуды  $\vec{E}, \vec{H}$  монохроматического поля с временной зависимостью  $\exp(-i\omega t)$  в такой среде подчиняются уравнениям

$$\operatorname{rot} \vec{H} = -i\omega(\varepsilon \vec{E} + \vec{P}), \quad \operatorname{rot} \vec{E} = i\omega(\mu \vec{H} + \vec{m}), \quad (1)$$

где  $\omega$  – круговая частота;  $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ ,  $\mu = \mu_0 \mu_r$ ,  $\varepsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость,  $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость матрицы;  $\varepsilon_0, \mu_0$  – электрическая и магнитная постоянные.

Электрическая и магнитная поляризации определяются объемными интегралами по пространственным переменным  $\vec{r}_0 = (x_0, y_0, z_0)$ :

$$\vec{P}(\vec{r}) = \frac{\varepsilon_0}{V_1} \int_{D_{1M}} K_1(|\vec{r} - \vec{r}_0|/R_1) \vec{E}(\vec{r}_0) d\vec{r}_0; \quad (2)$$

$$\vec{m}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{V_2} \int_{D_{2M}} K_2(|\vec{r} - \vec{r}_0|/R_2) \vec{H}(\vec{r}_0) d\vec{r}_0, \quad (3)$$

где  $D_{jM} = \{\vec{r}_0 \mid |\vec{r} - \vec{r}_0| < R_j\}$  – шар радиуса  $R_j$ , описанный вокруг точки  $M(x, y, z)$ ,  $M_0(x_0, y_0, z_0) \in D_{jM}$ ,  $\vec{r} = (x, y, z)$ ,  $V_j = \frac{4}{3} \pi R_j^3$ ;  $K_j(p)$  – заданные функции, определяющие характер пространственной дисперсии.

## 2. Дифференциальная модель среды с пространственной дисперсией

Уравнения (1)–(3), описывающие распространение электромагнитных волн в материальной среде с пространственной дисперсией, являются достаточно сложным объектом для аналитического и численного исследования. Поэтому для упрощения модели вводятся некоторые допущения, которые позволяют преобразовать интегро-дифференциальные уравнения (1)–(3) к системе дифференциальных уравнений с частными производными. Опишем методику преобразования уравнений. Итоговый результат сформулируем в виде теоремы.

**Теорема 1.** *С точностью до величин третьего порядка малости система интегро-дифференциальных уравнений (1)–(3) эквивалентна системе дифференциальных уравнений*

$$\text{rot } \vec{H} = -i\omega(\varepsilon_{\text{II}} \vec{E} + P \Delta \vec{E}), \quad \text{rot } \vec{E} = i\omega(\mu_{\text{II}} \vec{H} + m \Delta \vec{H}), \quad (4)$$

$$\text{где } \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}, \quad \varepsilon_{\text{II}} = \varepsilon_0 \left( \varepsilon_r + 3 \int_0^1 K_1(p) p^2 dp \right), \quad \mu_{\text{II}} = \mu_0 \left( \mu_r + 3 \int_0^1 K_2(p) p^2 dp \right),$$

$$P = \frac{1}{2} \varepsilon_0 R_1^2 \int_0^1 K_1(p) p^4 dp, \quad m = \frac{1}{2} \mu_0 R_2^2 \int_0^1 K_2(p) p^4 dp.$$

Доказательство. Компоненты вектора  $\vec{E}(\vec{r}_0) = E_x(\vec{r}_0) \vec{e}_x + E_y(\vec{r}_0) \vec{e}_y + E_z(\vec{r}_0) \vec{e}_z$  разложим в ряды Тейлора в окрестности точки  $M$ . Для упрощения модели ограничимся слагаемыми ряда до второго порядка включительно, пренебрегая величинами третьего порядка малости. Такое допущение правомочно, когда радиусы частиц  $R_j \ll \lambda_{\text{мат}}$  ( $\lambda_{\text{мат}}$  – длина волны в матрице) [1, с. 153]:

$$\begin{aligned} E_\alpha(\vec{r}_0) \approx & E_\alpha^M + \frac{\partial E_\alpha^M}{\partial x} (x_0 - x) + \frac{\partial E_\alpha^M}{\partial y} (y_0 - y) + \frac{\partial E_\alpha^M}{\partial z} (z_0 - z) + \\ & + \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial^2 E_\alpha^M}{\partial x^2} (x_0 - x)^2 + \frac{\partial^2 E_\alpha^M}{\partial y^2} (y_0 - y)^2 + \frac{\partial^2 E_\alpha^M}{\partial z^2} (z_0 - z)^2 \right] + \\ & + \frac{\partial^2 E_\alpha^M}{\partial x \partial y} (x_0 - x)(y_0 - y) + \frac{\partial^2 E_\alpha^M}{\partial x \partial z} (x_0 - x)(z_0 - z) + \frac{\partial^2 E_\alpha^M}{\partial y \partial z} (y_0 - y)(z_0 - z), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $E_\alpha^M = E_\alpha(\vec{r})$ ,  $\alpha = x, y, z$ .

Вычислим компоненты  $P_\alpha$  электрической поляризации (2). Подставляя (5) в (2), получим

$$P_\alpha(\vec{r}) = \varepsilon_0 \left( I_0^{(1)} E_\alpha^M + I_1^{(1)} \frac{\partial E_\alpha^M}{\partial x} + I_2^{(1)} \frac{\partial E_\alpha^M}{\partial y} + I_3^{(1)} \frac{\partial E_\alpha^M}{\partial z} + \right. \\ \left. + I_{11}^{(1)} \frac{\partial^2 E_\alpha^M}{\partial x^2} + I_{22}^{(1)} \frac{\partial^2 E_\alpha^M}{\partial y^2} + I_{33}^{(1)} \frac{\partial^2 E_\alpha^M}{\partial z^2} + I_{12}^{(1)} \frac{\partial^2 E_\alpha^M}{\partial x \partial y} + I_{13}^{(1)} \frac{\partial^2 E_\alpha^M}{\partial x \partial z} + I_{23}^{(1)} \frac{\partial^2 E_\alpha^M}{\partial y \partial z} \right), \quad (6)$$

где интегралы имеют вид

$$I_0^{(j)} = \frac{1}{V_j} \int_{D_{jM}} K_j(p_j) d\vec{r}_0, \quad I_1^{(j)} = \frac{1}{V_j} \int_{D_{jM}} K_j(p_j)(x_0 - x) d\vec{r}_0, \quad I_2^{(j)} = \frac{1}{V_j} \int_{D_{jM}} K_j(p_j)(y_0 - y) d\vec{r}_0, \\ I_3^{(j)} = \frac{1}{V_j} \int_{D_{jM}} K_j(p_j)(z_0 - z) d\vec{r}_0, \quad I_{11}^{(j)} = \frac{1}{2V_j} \int_{D_{jM}} K_j(p_j)(x_0 - x)^2 d\vec{r}_0, \\ I_{22}^{(j)} = \frac{1}{2V_j} \int_{D_{jM}} K_j(p_j)(y_0 - y)^2 d\vec{r}_0, \quad I_{33}^{(j)} = \frac{1}{2V_j} \int_{D_{jM}} K_j(p_j)(z_0 - z)^2 d\vec{r}_0, \quad (7) \\ I_{12}^{(j)} = \frac{1}{V_j} \int_{D_{jM}} K_j(p_j)(x_0 - x)(y_0 - y) d\vec{r}_0, \quad I_{13}^{(j)} = \frac{1}{V_j} \int_{D_{jM}} K_j(p_j)(x_0 - x)(z_0 - z) d\vec{r}_0, \\ I_{23}^{(j)} = \frac{1}{V_j} \int_{D_{jM}} K_j(p_j)(y_0 - y)(z_0 - z) d\vec{r}_0, \quad p_j = |\vec{r} - \vec{r}_0|/R_j, \quad j=1,2.$$

Для вычисления интегралов (7) введем сферическую систему координат  $Mr_0\theta_0\varphi_0$  с началом в точке  $M$ . Декартовы координаты точки  $M_0$  выражаются через сферические координаты с помощью формул

$$x_0 = x + r_0 \sin \theta_0 \cos \varphi_0, \quad y_0 = y + r_0 \sin \theta_0 \sin \varphi_0, \quad z_0 = z + r_0 \cos \theta_0. \quad (8)$$

Интегралы (7) вычислим в сферических координатах, подставляя (8) в (7) и полагая  $p_j = r_0/R_j$ ,  $d\vec{r}_0 = r_0^2 \sin \theta_0 dr_0 d\theta_0 d\varphi_0$ .

Получим

$$I_0^{(j)} = \frac{1}{V_j} \int_0^{R_j} K_j(r_0/R_j) r_0^2 dr_0 \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \sin \theta_0 d\theta_0 d\varphi_0 = \kappa_j = 3 \int_0^1 K_j(p) p^2 dp, \\ I_1^{(j)} = I_2^{(j)} = I_3^{(j)} = 0, \quad I_{12}^{(j)} = I_{13}^{(j)} = I_{23}^{(j)} = 0; \quad (9) \\ I_{11}^{(j)} = \frac{1}{2V_j} \int_0^{R_j} K_j(r_0/R_j) r_0^4 dr_0 \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \sin^3 \theta_0 \cos^2 \varphi_0 d\theta_0 d\varphi_0 = g_j = \frac{1}{2} R_j^2 \int_0^1 K_j(p) p^4 dp, \\ I_{22}^{(j)} = I_{33}^{(j)} = g_j.$$

Подставим значения интегралов (9) в (6), тогда компоненты электрической поляризации

$$P_\alpha = \varepsilon_0 (\kappa_1 E_\alpha^M + g_1 \Delta E_\alpha^M).$$

Вектор электрической поляризации

$$\vec{P}(\vec{r}) = \varepsilon_0 (\kappa_1 \vec{E}(\vec{r}) + g_1 \Delta \vec{E}(\vec{r})). \quad (10)$$

После аналогичных преобразований получим формулу для вектора магнитной поляризации:

$$\vec{m}(\vec{r}) = \mu_0 \left( \kappa_2 \vec{H}(\vec{r}) + g_2 \Delta \vec{H}(\vec{r}) \right). \quad (11)$$

Подставляя выражения (10), (11) в уравнения (1), приходим к требуемым дифференциальным уравнениям (4).

### 3. Базисные плоские электромагнитные поля

Построим систему плоских электромагнитных полей, распространяющихся в среде с пространственной дисперсией, т. е. полей  $\vec{E}, \vec{H}$ , удовлетворяющих уравнениям (4). Плоские поля представляют собой электромагнитные поля вида

$$\begin{aligned} \vec{E} &= (A_1 \vec{e}_x + B_1 \vec{e}_y + C_1 \vec{e}_z) \Phi(x, y) e^{\alpha z}, \\ \vec{H} &= (A_2 \vec{e}_x + B_2 \vec{e}_y + C_2 \vec{e}_z) \Phi(x, y) e^{\alpha z}, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha, A_j, B_j, C_j$  – постоянные;  $\Phi(x, y) = \exp(i\alpha_1 x + i\alpha_2 y)$ .

Для аналитического описания полей (12) воспользуемся волновыми полями [12, с. 96]:

$$\begin{aligned} \vec{W}^{(\mp 1)}(\vec{r}; \alpha_1, \alpha_2; k) &= \frac{i}{\lambda} (\alpha_2 \vec{e}_x - \alpha_1 \vec{e}_y) \Phi(x, y) \exp(\mp v z), \\ \vec{W}^{(\mp 2)}(\vec{r}; \alpha_1, \alpha_2; k) &= \frac{1}{k} \left( \mp \frac{iv}{\lambda} (\alpha_1 \vec{e}_x + \alpha_2 \vec{e}_y) + \lambda \vec{e}_z \right) \Phi(x, y) \exp(\mp v z), \end{aligned} \quad (13)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2, k$  – произвольные комплексные постоянные,  $\lambda = \sqrt{\alpha_1^2 + \alpha_2^2}$ ,  $0 \leq \arg \lambda < \pi$ ,

$$v = \sqrt{\lambda^2 - k^2}, \quad -\frac{\pi}{2} \leq \arg v < \frac{\pi}{2}.$$

Заметим, что для полей (13) выполнены формулы [12, с. 98]:

$$\begin{aligned} \text{rot } \vec{W}^{(\mp 1)} &= k \vec{W}^{(\mp 2)}, \quad \text{rot } \vec{W}^{(\mp 2)} = k \vec{W}^{(\mp 1)}, \\ \text{div } \vec{W}^{(\mp 1)} &= 0, \quad \text{div } \vec{W}^{(\mp 2)} = 0, \quad \Delta \vec{W}^{(\mp j)} = -k^2 \vec{W}^{(\mp j)}, \end{aligned} \quad (14)$$

так как  $\Delta \vec{W} = \text{grad div } \vec{W} - \text{rot rot } \vec{W}$ .

Решение системы уравнений (4) вида (12) представим через волновые поля (13).

**Теорема 2.** Электромагнитные поля

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \vec{W}_+^{(\mp 1)}(\vec{r}; \alpha_1, \alpha_2) = E_0 \vec{W}^{(\mp 1)}(\vec{r}; \alpha_1, \alpha_2; k_+), \\ \vec{H} &= \vec{V}_+^{(\mp 1)}(\vec{r}; \alpha_1, \alpha_2) = E_0 \gamma_+ \vec{W}^{(\mp 2)}(\vec{r}; \alpha_1, \alpha_2; k_+); \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \vec{W}_+^{(\mp 2)}(\vec{r}; \alpha_1, \alpha_2) = E_0 \vec{W}^{(\mp 2)}(\vec{r}; \alpha_1, \alpha_2; k_+), \\ \vec{H} &= \vec{V}_+^{(\mp 2)}(\vec{r}; \alpha_1, \alpha_2) = E_0 \gamma_+ \vec{W}^{(\mp 1)}(\vec{r}; \alpha_1, \alpha_2; k_+); \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \vec{W}_-^{(\mp 1)}(\vec{r}; \alpha_1, \alpha_2) = E_0 \vec{W}^{(\mp 1)}(\vec{r}; \alpha_1, \alpha_2; k_-), \\ \vec{H} &= \vec{V}_-^{(\mp 1)}(\vec{r}; \alpha_1, \alpha_2) = E_0 \gamma_- \vec{W}^{(\mp 2)}(\vec{r}; \alpha_1, \alpha_2; k_-); \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned}\vec{E} &= \vec{W}_-^{(\mp 2)}(\vec{r}; \alpha_1, \alpha_2) = E_0 \vec{W}^{(\mp 2)}(\vec{r}; \alpha_1, \alpha_2; k_-), \\ \vec{H} &= \vec{V}_-^{(\mp 2)}(\vec{r}; \alpha_1, \alpha_2) = E_0 \gamma_- \vec{W}^{(\mp 1)}(\vec{r}; \alpha_1, \alpha_2; k_-),\end{aligned}\quad (18)$$

где  $E_0$  – постоянная, физическая размерность  $[E_0] = \frac{B}{M}$ ,  $|E_0| = 1$ ,

$$\gamma_{\pm} = \left[ \frac{1}{2m\mu_{\Pi}} \left( -B \pm \sqrt{B^2 - 4\varepsilon_{\Pi}\mu_{\Pi}mP} \right) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad k_{\pm} = i\omega\gamma_{\pm} \frac{\mu_{\Pi}P - \varepsilon_{\Pi}m}{m\gamma_{\pm}^2 + P}, \quad (19)$$

$$B = \varepsilon_{\Pi}m + \mu_{\Pi}P + \omega^2(\varepsilon_{\Pi}m - \mu_{\Pi}P)^2,$$

удовлетворяют системе уравнений (4) при условии  $\operatorname{div} \vec{E} = 0, \operatorname{div} \vec{H} = 0$ .

Доказательство. Систему уравнений (4) запишем в виде

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \delta_1 \vec{E} + \delta_2 \Delta \vec{E}, \quad \operatorname{rot} \vec{E} = \beta_1 \vec{H} + \beta_2 \Delta \vec{H}, \quad (20)$$

где

$$\delta_1 = -i\omega\varepsilon_{\Pi}, \quad \delta_2 = -i\omega P, \quad \beta_1 = i\omega\mu_{\Pi}, \quad \beta_1 = i\omega\mu_{\Pi}, \quad \beta_2 = i\omega m. \quad (21)$$

В качестве решения системы (20) выберем поля

$$\vec{E} = E_0 \vec{W}^{(\mp 1)}(\vec{r}; \alpha_1, \alpha_2; k), \quad \vec{H} = E_0 \gamma \vec{W}^{(\mp 2)}(\vec{r}; \alpha_1, \alpha_2; k). \quad (22)$$

Для определения постоянных  $k, \gamma$  поля (22) подставим в уравнение (20). Учитывая соотношения (14), получим систему алгебраических уравнений для определения величин  $k, \gamma$ :

$$\delta_2 k^2 + \gamma k - \delta_1 = 0; \quad (23)$$

$$\beta_2 \gamma k^2 + k - \beta_1 \gamma = 0. \quad (24)$$

Комбинируя уравнения (23), (24), исключим величину  $k^2$ , тогда

$$k = \gamma \frac{\delta_1 \beta_2 - \beta_1 \delta_2}{\beta_2 \gamma^2 - \delta_2}. \quad (25)$$

Подставив (25) в (23), получим биквадратное уравнение для определения  $\gamma$ :

$$\beta_1 \beta_2 X^2 - bX + \delta_1 \delta_2 = 0, \quad \gamma = \pm \sqrt{X}, \quad (26)$$

где  $b = (\delta_1 \beta_2 - \beta_1 \delta_2)^2 + \delta_1 \beta_2 + \beta_1 \delta_2$ .

Заметим, что знаки  $+$  или  $-$  на определение полей (15)–(18) не влияют, поэтому положим  $\gamma = \sqrt{X}$ ,  $0 \leq \arg \gamma < \pi$ .

Разрешая уравнение (26), определим

$$X = X_{\mp} = \frac{1}{2\beta_1 \beta_2} \left( b \mp \sqrt{b^2 - 4\delta_1 \delta_2 \beta_1 \beta_2} \right), \quad \gamma = \gamma_{\pm} = \sqrt{X_{\mp}}. \quad (27)$$

Из формулы (25) следует

$$k_{\pm} = \gamma_{\pm} \frac{\delta_1 \beta_2 - \beta_1 \delta_2}{\beta_2 \gamma_{\pm}^2 - \delta_2}. \quad (28)$$

После подстановки значений (21) в (27), (28) приходим к требуемым формулам (19), которые определяют поля (15), (17). Формулы (16), (18) доказываются аналогично, достаточно поля (22) заменить на поля

$$\vec{E} = E_0 \vec{W}^{(\mp 2)}(\vec{r}; \alpha_1, \alpha_2; k), \quad \vec{H} = E_0 \gamma \vec{W}^{(\mp 1)}(\vec{r}; \alpha_1, \alpha_2; k).$$

Из соотношений (14) следуют условия  $\operatorname{div} \vec{E} = 0$ ,  $\operatorname{div} \vec{H} = 0$  для полей (15)–(18).

#### 4. Магнитоэлектрическая среда с пространственной дисперсией

Рассмотрим частный случай среды с пространственной дисперсией ( $K_2(p) = 0$ ), в которой монохроматическое поле  $\vec{E}, \vec{H}$  удовлетворяет системе уравнений, соответствующей системе (1):

$$\operatorname{rot} \vec{H} = -i\omega(\varepsilon \vec{E} + \vec{P}), \quad \operatorname{rot} \vec{E} = i\omega \mu \vec{H}, \quad (29)$$

где магнитная проницаемость  $\mu$  – произвольное комплексное число, а электрическая поляризация  $\vec{P}$  определяется формулой (2).

Систему интегро-дифференциальных уравнений (29) преобразуем к системе дифференциальных уравнений с помощью замены (5).

В результате получим уравнение вида (4):

$$\operatorname{rot} \vec{H} = -i\omega(\varepsilon_{\Pi} \vec{E} + P \Delta \vec{E}), \quad \operatorname{rot} \vec{E} = i\omega \mu \vec{H}. \quad (30)$$

Так как рассматриваются поля, которые удовлетворяют условиям  $\operatorname{div} \vec{E} = 0$ ,  $\operatorname{div} \vec{H} = 0$ , то  $\Delta \vec{E} = -\operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{E}$ . Учитывая второе уравнение (30), преобразуем первое уравнение (30) к виду

$$\operatorname{rot} \vec{H} = -\frac{i\omega \varepsilon_{\Pi}}{1 + \omega^2 \mu P} \vec{E}.$$

В результате получим уравнения Максвелла для электромагнитных полей в магнитоэлектрической среде

$$\operatorname{rot} \vec{H} = -i\omega \varepsilon_p \vec{E}, \quad \operatorname{rot} \vec{E} = i\omega \mu \vec{H},$$

где  $\varepsilon_p = \varepsilon_{\Pi} / (1 + \omega^2 \mu P)$ ,  $\mu = \mu_0 \mu_r$ ,  $P = \varepsilon_0 P_r$ .

Показано, что в частных случаях среда с пространственной дисперсией эквивалентна специальной магнитоэлектрической среде.

Рассмотрим подынтегральную функцию в (2) экспоненциального вида

$$K_1(p) = K \frac{\exp(a(1-p)) - 1}{\exp(a) - 1}, \quad (31)$$

где  $K, a$  – заданные постоянные.



Тогда

$$\varepsilon_{\Pi} = \varepsilon + \varepsilon_0 K \left( \frac{6}{a^3} - \frac{a^2 + 3a + 6}{a^2(e^a - 1)} \right),$$

$$P_r = \frac{1}{2} KR_1^2 \left( \frac{24}{a^5} - \frac{a^4 + 5(a^3 + 4a^2 + 12a + 24)}{5a^4(e^a - 1)} \right).$$

В результате получим

$$\varepsilon_p = \frac{\varepsilon_{\Pi}}{1 + k_0^2 \mu_r P_r}, \quad k_0 = \frac{\omega}{c},$$

где  $c$  – скорость света в вакууме.

Заметим, что в качестве функции (31) может быть рассмотрена комплекснозначная функция.

### Заключение

В работе предложена математическая модель уравнений Максвелла монохроматической электродинамики с электрической и магнитной поляризациями, которые представлены в виде операторов Лапласа, примененных к электрическому и магнитному полям. Такая модель описывает распространение электромагнитных волн в однородных средах с пространственной дисперсией. Уравнения разрешены аналитически и построена полная система прямых и обратных плоских электромагнитных волн. Число независимых полей вдвое больше, чем в обычных средах. Поля представлены через базисные электромагнитные поля, распространяющиеся в специальных магнитодиэлектрических средах.

Работа выполнена в соответствии с заданием 1.1.09 Государственной программы научных исследований «Информатика, космос и безопасность» на 2016–2020 гг.

### Список литературы

1. Виноградов, А.П. Электродинамика композитных материалов / А.П. Виноградов. – М. : Эдиториал УРСС, 2001. – 206 с.
2. Костин, М.В. К теории киральной среды на основе сферических спирально проводящих частиц / М.В. Костин, В.В. Шевченко // Радиотехника и электроника. – 1998. – Т. 43, № 8. – С. 921–926.
3. Шатров, А.Д. Модель биизотропной среды из резонансных сферических частиц с идеальной смешанной проводимостью поверхности вдоль спиральных линий / А.Д. Шатров // Радиотехника и электроника. – 2000. – Т. 45, № 10. – С. 1168–1170.
4. Проникновение электромагнитных волн через композитные экраны, содержащие идеально проводящие спирали / В.Т. Ерофеевко [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 2011. – Т. 84, № 4. – С. 740–746.
5. Виноградов, А.П. К вопросу об эффективных параметрах метаматериалов / А.П. Виноградов, А.В. Дорофеевко, С. Зухди // Успехи физических наук. – 2008. – Т. 178, № 5. – С. 514–518.
6. Ерофеевко, В.Т. Электродинамическая модель расчета эффективных параметров композитов из сферических биизотропных частиц / В.Т. Ерофеевко // Информатика. – 2014. – № 1. – С. 45–58.
7. Ерофеевко, В.Т. Экранирование электромагнитных полей экранами из матричных композитов, содержащих биизотропные частицы / В.Т. Ерофеевко, В.Ф. Бондаренко // Информатика. – 2014. – № 3. – С. 28–43.
8. Ерофеевко, В.Т. Модель вычисления эффективных параметров матричного композита из биизотропных частиц с учетом многократных переотражений электромагнитного поля / В.Т. Ерофеевко // Информатика. – 2015. – № 4. – С. 17–33.

9. Агранович, В.М. Кристаллооптика с учетом пространственной дисперсии и теория экситонов / В.М. Агранович, В.Л. Гинзбург. – М. : Наука, 1979. – 432 с.
10. Силин, Р.А. Обратные волны и пространственная дисперсия / Р. А. Силин, И. Р. Тимошина // Радиотехника и электроника. – 2012. – Т. 57, № 7. – С. 725–733.
11. Модель взаимодействия электромагнитных и тепловых полей в средах с запаздыванием / Н.Н. Гринчик [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 2009. – Т. 82, № 1. – С. 177–183.
12. Ерофеенко, В.Т. Аналитическое моделирование в электродинамике / В.Т. Ерофеенко, И.С. Козловская. – Минск : БГУ, 2010. – 304 с.

Поступила 30.05.2017

*Учреждение БГУ  
«НИИ прикладных проблем  
математики и информатики»,  
Минск, пр. Независимости, 4  
e-mail: bsu\_erofeenko@tut.by*

**V.T. Erofeenko**

**MODELING OF ELECTROMAGNETIC WAVES PROPAGATION  
IN THE MEDIUM WITH SPACE DISPERSION**

A mathematical model describing the propagation of electromagnetic waves in the medium with space dispersion is being developed. Modeling is based on the transformation of integro-differential equations of monochromatic electrodynamics for the fields in the medium with space dispersion to the differential model with second degree partial differential equations. Within the developed model a full system of basic plane electromagnetic fields, extending in homogeneous medium with space dispersion, is analytically constructed.

УДК 519.872

В.И. Клименок

## СТАЦИОНАРНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТАНДЕМНОЙ СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ПОТОКАМИ НА СТАНЦИЯХ

*Исследуется стационарное поведение тандемной системы, состоящей из конечного числа многолинейных станций без буферов. В систему поступает марковский поток запросов, каждый из которых должен получить обслуживание на всех станциях тандема. Кроме транзитных запросов, на каждую станцию тандема поступает дополнительный марковский поток запросов, которые должны обслужиться на этой и всех последующих станциях тандема. Времена обслуживания запросов на станциях распределены по экспоненциальному закону с параметрами, зависящими от номера станции. Приводятся алгоритмы для вычисления стационарного распределения тандема и вероятностей потерь, ассоциированных с тандемом.*

### Введение

Теория тандемных (многофазных) систем массового обслуживания представляет собой связывающее звено между теорией массового обслуживания и теорией сетей массового обслуживания. Такие системы могут рассматриваться как простейшие случаи сетей массового обслуживания с линейной топологией. Тандемные системы являются популярной темой для исследований [1–3].

Большинство работ, посвященных тандемным системам, ограничиваются рассмотрением двухфазных тандемов со стационарным пуассоновским входящим потоком. В настоящей статье рассматривается тандемная система, состоящая из произвольного конечного числа фаз (станций), представленных многолинейными системами без буферов. В эту систему поступает марковский поток запросов (общепринятая в мировой литературе аббревиатура *MAP* (Markovian Arrival Process)). Предположение, что процесс поступления запросов определяется как *MAP*, позволяет учесть коррелированный нестационарный характер информационных потоков в современных телекоммуникационных сетях [4, 5].

Запрос, поступающий в рассматриваемую систему, должен получить последовательное обслуживание на всех станциях тандема. Кроме транзитных запросов, на каждую станцию тандема поступает дополнительный *MAP*-поток запросов, которые должны обслужиться на этой и всех последующих станциях тандема. В силу отсутствия мест для ожидания на станциях запросы из основного и дополнительных потоков могут быть потеряны на каждой из них. Качество обслуживания в системе определяется в основном вероятностью успешного обслуживания произвольного запроса на всех станциях. Вместе с тем для оценки эффективности тандема, а также для обнаружения и предотвращения так называемых узких мест в тандемной сети используются вероятности потерь на различных участках и подсистемах тандема.

В качестве релевантных работ стоит отметить [6, 7]. В этих работах рассматриваются системы с рекуррентными входящими потоками  $GI/M/1/1 \rightarrow (\cdot/M/1/1)^{n-1}$ . Поскольку интервалы между поступлениями запросов в рекуррентном потоке являются независимыми случайными величинами, распределенными по произвольному закону, то этот поток можно рассматривать как более общий, чем *MAP*. Вместе с тем и *MAP* можно считать более общим потоком по сравнению с рекуррентным, поскольку в нем времена между моментами поступления запросов могут быть зависимыми. Кроме того, в отличие от [6, 7], где все станции представлены однолинейными системами, будем считать, что станции могут состоять из произвольного и, вообще говоря, разного числа приборов.

### 1. Описание модели

Рассматривается тандемная система массового обслуживания, состоящая из  $R$ ,  $R > 1$ , станций. В терминах обозначений Кендалла эта система может быть описана как

$$MAP_1/M/N_1/0 \rightarrow \cdot, MAP_2/M/N_2/0 \rightarrow \dots \rightarrow \cdot, MAP_R/M/N_R/0.$$

Станция номер  $r$  представлена системой из  $N_r$  приборов без буфера. Приборы, принадлежащие одной и той же станции, независимые и идентичные. Время обслуживания любого запроса на приборе  $r$ -й станции распределено по экспоненциальному закону с параметром  $\mu_r$ .

На вход первой станции поступает  $MAP$ -поток запросов. Поступление запросов в  $MAP$ -потоке происходит под управлением неприводимой цепи Маркова  $v_t$ ,  $t \geq 0$ , с непрерывным временем и конечным пространством состояний  $\{0, 1, \dots, W\}$ . Время пребывания цепи в состоянии  $v$  распределено по экспоненциальному закону с параметром  $\lambda_v$ . По истечении этого времени процесс  $v_t$  с вероятностью  $p_{v,v'}^{(0)}$  переходит в некоторое другое состояние  $v'$  без генерации запроса и с вероятностью  $p_{v,v'}^{(1)}$  – с генерацией запроса,  $v, v' \in \{0, \dots, W\}$ .

Поведение  $MAP$ -потока полностью характеризуется квадратными матрицами  $D_0, D_1$  порядка  $W + 1$ , элементы которых определяются следующим образом:

$$(D_1)_{v,v'} = \lambda_v p_{v,v'}^{(1)}, \quad v, v' \in \{0, \dots, W\},$$

$$(D_0)_{v,v} = -\lambda_v, \quad v \in \{0, \dots, W\}, \quad (D_0)_{v,v'} = \lambda_v p_{v,v'}^{(0)}, \quad v, v' \in \{0, \dots, W\}, v \neq v'.$$

При этом матрица  $D = D_0 + D_1$  является инфинитезимальным генератором цепи Маркова  $v_t$ ,  $t \geq 0$ .

Интенсивность  $\lambda$  поступления запросов в  $MAP$  определяется как

$$\lambda = \theta D_1 e,$$

где  $\theta$  – вектор-строка стационарного распределения цепи Маркова  $v_t$ ,  $t \geq 0$ . Вектор  $\theta$  является единственным решением системы линейных алгебраических уравнений

$$\theta D(1) = \mathbf{0}, \quad \theta e = 1.$$

Здесь и далее  $e$  – вектор-столбец, состоящий из единиц;  $\mathbf{0}$  – вектор-строка, состоящая из нулей.

Более подробное описание  $MAP$ -потока и его свойств можно найти в [8].

Возвращаясь к рассматриваемой системе, обозначим  $MAP$ -поток, входящий на первую станцию тандема, как  $MAP_1$ . Пространство состояний управляющего процесса этого потока определим как  $\{0, 1, \dots, W_1\}$ . Каждый из запросов должен последовательно обслужиться на всех станциях тандема. Кроме потока запросов, поступающих на  $r$ -ю,  $r > 1$ , станцию из  $(r - 1)$ -й станции, на нее поступает дополнительный  $MAP$ -поток запросов, который обозначим как  $MAP_r$ . Пространство состояний управляющего процесса данного потока определим как  $\{0, 1, \dots, W_r\}$ . Запросы из  $MAP$ -потока идентичны запросам, поступающим из  $(r - 1)$ -й станции, и должны обслужиться на  $r$ -й,  $(r + 1)$ -й, ...,  $R$ -й станциях.

Обозначим матрицы, задающие  $MAP_1$ , как  $D_0, D_1$ , а аналогичные матрицы, задающие  $MAP_r$ , как  $H_0^{(r)}, H_1^{(r)}$ . Интенсивность поступления запросов в  $MAP_1$  обозначим как  $\tilde{\lambda}_1$ , интенсивность поступления запросов в  $MAP_r$ ,  $r > 1$ , – как  $h_r$ .

Если запрос, поступающий на  $r$ -ю станцию тандема, застаёт все приборы занятыми, то он покидает тандем навсегда.

Целью настоящей работы является изучение выходящих потоков со станций тандема, расчет стационарного распределения тандема и его фрагментов и вероятностей потерь на отдельных станциях системы.

## 2. Проблема расчета стационарного распределения в тандеме. Выходящие потоки из станций тандема

Процесс изменения состояний системы описывается в терминах неприводимой многомерной цепи Маркова с непрерывным временем

$$\xi_t = \{n_t^{(R)}, n_t^{(R-1)}, \dots, n_t^{(1)}, v_t^{(R)}, v_t^{(R-1)}, \dots, v_t^{(1)}\}, t \geq 0,$$

где  $n_t^{(r)}$  – число занятых приборов на  $r$ -й станции;

$v_t^{(r)}$  – состояние управляющего процесса  $MAR_r$ -потока в момент времени  $t$ ,  $n_t^{(r)} = \overline{0, N_r}$ ,  $v_t^{(r)} = \overline{0, W_r}$ ,  $r = \overline{1, R}$ .

Пространство состояний цепи Маркова  $\xi_t$  задается как

$$S = \{\{0, 1, \dots, N_1\} \times \dots \times \{0, 1, \dots, N_R\} \times \{0, 1, \dots, W_1\} \times \dots \times \{0, 1, \dots, W_R\}\}.$$

Вектор-строка  $\mathbf{p}$  стационарных вероятностей состояний цепи имеет размерность  $\prod_{r=1}^R (N_r + 1)(W_r + 1)$  и вычисляется как единственное решение системы линейных алгебраических уравнений

$$\mathbf{p}Q = 0, \mathbf{p}\mathbf{e} = 1, \quad (1)$$

где матрица  $Q$  является инфинитезимальным генератором цепи Маркова  $\xi_t$ ,  $t \geq 0$ . Построение данной матрицы может быть выполнено с помощью стандартной методики, используемой в теории сетей массового обслуживания, и является не слишком трудной задачей. Однако такая работа в случае более или менее большого значения  $R$  является достаточно трудоемкой. Вследствие этого представляется интересным найти способ для расчета стационарных распределений состояний тандема в целом или его частей (фрагментов) либо маргинальных стационарных распределений состояний любой станции, не записывая явное выражение для генератора  $Q$ . Стоит отметить, что функционирование фрагмента тандема, состоящего из любого количества станций и расположенного в начале тандема, не зависит от состояний остальных станций. Таким образом, интуитивно ясно, что какая-либо декомпозиция может быть применена для расчета стационарного распределения тандема и его фрагментов без полного построения генератора.

В настоящем исследовании разрабатывается простой, точный и удобный метод вычисления маргинальных стационарных распределений вероятностей фрагментов тандема, а также всего тандема и соответствующих вероятностей потерь. Метод основан на анализе выходящих и входящих потоков на станциях тандема, в результате которого доказано, что такие потоки принадлежат классу  $MAR$ -потоков. Соответствующие результаты сформулированы в следующей теореме.

**Теорема 1.** *Выходящий поток из  $r$ -й станции тандема,  $r = \overline{1, R}$ , принадлежит классу  $MAR$ -потоков. Этот  $MAR$ -поток задается матрицами  $D_0^{(r)}$  и  $D_1^{(r)}$ , которые вычисляются по следующим рекуррентным формулам:*

$$D_0^{(r)} = -\mu_r \text{diag}\{0, 1, \dots, N_r\} \otimes I_{K_r} +$$

$$+ \begin{pmatrix} D_0^{(r-1)} \oplus H_0^{(r)} & D_1^{(r-1)} \oplus H_1^{(r)} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & D_0^{(r-1)} \oplus H_0^{(r)} & D_1^{(r-1)} \oplus H_1^{(r)} & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_0^{(r-1)} \oplus H_0^{(r)} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & D_0^{(r-1)} \oplus H_0^{(r)} & D_1^{(r-1)} \oplus H_1^{(r)} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & D^{(r-1)} \oplus H^{(r)} \end{pmatrix}; \quad (2)$$

$$D_1^{(r)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \mu_r & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2\mu_r & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & (N_r - 1)\mu_{r-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & N_r\mu_r & 0 \end{pmatrix} \otimes I_{K_r}, r = \overline{1, R}, \quad (3)$$

с начальными условиями

$$D_0^{(0)} = D_0, \quad D_1^{(0)} = D_1, \quad H_0^{(1)} = H_1^{(1)} = 0.$$

Здесь  $\oplus$  – знак кронекеровой суммы матриц [9],  $D^{(r)} = D_0^{(r)} + D_1^{(r)}$ ,  $H^{(r)} = H_0^{(r)} + H_1^{(r)}$ ; величины  $K_r$  вычисляются следующим образом:  $K_r = \prod_{r'=1}^{r-1} (N_{r'} + 1) \prod_{r'=1}^r (W_{r'} + 1)$ ,  $r = \overline{2, R}$ ;  $I_{K_r}$  – тождественная матрица порядка  $K_r$ .

Доказательство. Пусть  $r = 1$ . Очевидно, что процесс  $\{n_t^{(1)}, v_t^{(1)}\}$ ,  $t \geq 1$ , описывающий функционирование первой станции тандема, является цепью Маркова. Перенумеруем состояния этой цепи в лексикографическом порядке:  $(0, 0), (0, 1), \dots, (0, W), (1, 0), (1, 1), \dots, (1, W), \dots, (N_1, 0), (N_1, 1), \dots, (N_1, W)$ . Легко видеть, что интенсивности переходов цепи, которые не сопровождаются окончанием обслуживания на первой станции и генерацией запроса, переходящего на вторую станцию, определяются матрицей  $D_0^{(1)}$ , заданной формулой (2). Интенсивности переходов, которые сопровождаются окончанием обслуживания на первой станции и генерацией запроса, переходящего на вторую станцию, определяются матрицей  $D_1^{(1)}$ , заданной формулой (3). Согласно определению *МАР* это означает, что выходящий поток из первой станции (транзитный поток на вторую станцию) есть *МАР*, определенный матрицами  $D_0^{(1)}$  и  $D_1^{(1)}$ , которые вычисляются по формулам (2), (3).

Кроме транзитного потока, на вторую станцию поступает дополнительный *МАР*<sub>2</sub>-поток новых запросов, который определяется матрицами  $H_0^{(2)}$  и  $H_1^{(2)}$ . Тогда суммарный поток запросов, поступающих на вторую станцию, является суперпозицией транзитного и дополнительного потоков новых запросов и определяется матрицами  $\tilde{D}_0^{(2)} = D_0^{(1)} \oplus H_0^{(2)}$  и  $\tilde{D}_1^{(2)} = D_1^{(1)} \oplus H_1^{(2)}$ .

Пусть теперь  $r = 2$ . Используя те же рассуждения, что и в случае  $r = 1$ , приходим к выводу, что выходящий поток из второй станции есть *МАР*, определенный матрицами  $D_0^{(2)}$  и  $D_1^{(2)}$ , которые заданы формулами (2), (3). Дальнейшее доказательство при  $r > 2$  проводится по индукции.

**Следствие 1.** *Входящий на  $r$ -ю станцию тандема поток принадлежит классу *МАР*-потоков. Этот *МАР*-поток задается матрицами*

$$\tilde{D}_0^{(r)} = D_0^{(r-1)} \oplus H_0^{(r)}, \quad \tilde{D}_1^{(r)} = D_1^{(r-1)} \oplus H_1^{(r)}, r = \overline{1, R}. \quad (4)$$

*Замечание 1.* Положив в формуле (4)  $r = 1$ , получим естественные соотношения

$$\tilde{D}_k^{(1)} = D_k^{(0)} = D_k, \quad k = 0, 1.$$

*Замечание 2.* В дальнейшем будем обозначать суммарный входящий МАР-поток на  $r$ -ю станцию как  $МАР^{(r)}$ ,  $r = \overline{1, R}$ . Заметим, что обозначение  $МАР^{(1)}$  означает то же, что и ранее введенное обозначение  $МАР_1$ . Оба этих обозначения используются для входящего потока на первую станцию.

Используя результаты теоремы 1, можно рассчитать маргинальное стационарное распределение  $r$ -й станции тандема как стационарное распределение системы массового обслуживания  $МАР^{(r)}/M/N_r/0$ ,  $r = \overline{1, R}$ . Хотя такое стационарное распределение определяется как решение системы линейных алгебраических уравнений, при больших значениях числа приборов  $N_r$  и размерности управляющего процесса входного потока  $МАР^{(r)}$  решить эту систему стандартными методами не представляется возможным. Для удобства читателя в следующем разделе будут коротко описаны адаптированные алгоритмы вычисления стационарного распределения такого типа систем. Для краткости опустим индекс  $r$  в обозначении матриц, описывающих МАР-поток, а также в обозначениях интенсивностей обслуживания.

### 3. Стационарное распределение системы МАР/M/N/0

Функционирование системы  $МАР/M/N/0$  описывается цепью Маркова  $\eta_t = \{n_t, v_t\}$ , где  $n_t$  – число занятых приборов, а  $v_t, v_t \in \{0, \dots, W\}$  – состояние управляющего процесса МАР в момент времени  $t$ .

Перенумеруем состояния цепи в лексикографическом порядке. Тогда инфинитезимальный генератор этой цепи определяется как

$$A = \begin{pmatrix} D_0 & D_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \mu I & D_0 - \mu I & D_1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 2\mu I & D_0 - 2\mu I & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & D_0 - (N-1)\mu I & D_1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & N\mu I & D - N\mu I \end{pmatrix}.$$

Пусть  $\mathbf{q}$  является вектором-строкой стационарного распределения вероятностей состояний цепи. Этот вектор определяется как единственное решение системы линейных алгебраических уравнений

$$\mathbf{q}A = 0, \quad \mathbf{q}\mathbf{e} = 1.$$

В случае большой размерности данной системы для ее решения целесообразно использовать специальные алгоритмы. Наиболее известные из них описаны ниже.

Представим вектор  $\mathbf{q}$  как  $\mathbf{q} = (\mathbf{q}_0, \mathbf{q}_1, \dots, \mathbf{q}_N)$ , где векторы  $\mathbf{q}_i, i = 0, \dots, N$ , имеют порядок  $W + 1$ .

*Алгоритм 1.* Векторы  $\mathbf{q}_i, i = 0, \dots, N$ , вычисляются как

$$\mathbf{q}_i = \mathbf{q}_0 F_i, \quad i = 0, \dots, N,$$

где матрицы  $F_i$  вычисляются рекуррентно по формулам

$$F_0 = I, \quad F_i = \frac{1}{i\mu} [F_{i-1}((i-1)\mu I - D_0) - (1 - \delta_{i,1})F_{i-2}D_1], \quad i = 1, \dots, N,$$

а вектор  $\mathbf{q}_0$  является единственным решением системы

$$\mathbf{q}_0(F_{N-1}D_1 + F_N(D - N\mu I)) = 0, \quad \mathbf{q} \sum_{i=0}^N F_i \mathbf{e} = 1.$$

Здесь  $\delta_{i,1}$  – дельта Кронекера.

Более подробную информацию об алгоритме 1 можно найти в [10].

Видно, что рекурсия для  $F_i$  включает в себя операцию вычитания. Значит, в случае, когда значение  $N$  является большим, описанный алгоритм может быть численно неустойчивым. В такой ситуации может быть применен алгоритм, основанный на вероятностном смысле матрицы  $A$  [11]. Этот алгоритм основан на применении техники сенсорных цепей Маркова [12] и описывается следующим образом.

*Алгоритм 2.* Векторы стационарного распределения  $\mathbf{q}_i$ ,  $i = 0, \dots, N$ , определяются как

$$\mathbf{q} = \mathbf{q}_0 \Phi_l, \quad l = 1, \dots, N,$$

где матрицы  $\Phi_l$  вычисляются по следующим рекуррентным формулам:

$$\Phi_0 = I, \quad \Phi_i = \Phi_{i-1} D_1 (i\mu I - D_0 - (1 - \delta_{i,N}) D_1 G_i)^{-1}, \quad i = 1, \dots, N,$$

а матрицы  $G_i$ ,  $i = \overline{0, N-1}$ , вычисляются с помощью обратной рекурсии

$$G_i = (i+1)\mu [(i+1)\mu I - D_0 - D_1 G_{i+1}]^{-1}, \quad i = N-2, N-3, \dots, 0,$$

при начальном условии

$$G_{N-1} = N\mu (N\mu I - D)^{-1}.$$

Вектор  $\mathbf{q}_0$  является единственным решением системы линейных алгебраических уравнений:

$$\mathbf{q}_0 (D_0 + D_1 G_0) = 0, \quad \mathbf{q}_0 \sum_{i=0}^N \Phi_i \mathbf{e} = 1.$$

Обратим внимание, что операции вычитания не присутствуют в данном алгоритме, а все обратные матрицы существуют и неотрицательны. Таким образом, алгоритм является численно устойчивым.

#### 4. Расчет стационарного распределения тандема и его фрагментов

В данном разделе приведен метод расчета стационарного распределения тандема и его фрагментов на основе результатов исследования выходящих потоков, представленных в теореме 1.

Пусть  $\langle r, r+1, \dots, r' \rangle$  обозначает фрагмент тандема, состоящий из  $r$ -й,  $(r+1)$ -й, ...,  $r'$ -й станций,  $1 \leq r \leq r' \leq R$ .

**Теорема 2.** Стационарное распределение фрагмента  $\langle r, r+1, \dots, r' \rangle$  рассматриваемого тандема может быть рассчитано как стационарное распределение тандема  $MAP^{(r)}/M/N_r/N_r \rightarrow \cdot/M/N_{r+1}/N_{r+1} \rightarrow \dots \rightarrow \cdot/M/N_{r'}/N_{r'}$ , где  $MAP^{(r)}$  определяется по формулам (2)–(4).

**Следствие 2.** Вектор  $\mathbf{p}^{(r)}$  маргинального стационарного распределения  $r$ -й станции тандема вычисляется как стационарное распределение системы массового обслуживания  $MAP^{(r)}/M/N_r/N_r$ ,  $r = 1, 2, \dots, R$ .

**Теорема 3.** Совместное стационарное распределение  $\mathbf{p}^{(1, \dots, r)}$  вероятностей состояний первых  $r$  станций тандема может быть рассчитано как стационарное распределение управляющего процесса выходящего  $MAP^{(r)}$ -потока из  $r$ -й станции, т. е. имеет место формула



$$\mathbf{p}^{(1,\dots,r)} = \boldsymbol{\theta}^{(r)},$$

где вектор  $\boldsymbol{\theta}^{(r)}$  – единственное решение системы

$$\boldsymbol{\theta}^{(r)}(D_0^{(r)} + D_1^{(r)}) = \mathbf{0}, \quad \boldsymbol{\theta}^{(r)}\mathbf{e} = 1, \quad r = \overline{1, R},$$

а матрицы  $D_0^{(r)}, D_1^{(r)}$  вычисляются по рекуррентным формулам (2), (3).

Очевидно, что вектор  $\mathbf{p}$  стационарного распределения всего тандема совпадает с вектором  $\mathbf{p}^{(1,\dots,R)}$ .

**Следствие 3.** Вектор  $\mathbf{p}$  стационарного распределения тандема вычисляется как единственное решение системы линейных алгебраических уравнений

$$\mathbf{p}(D_0^{(R)} + D_1^{(R)}) = \mathbf{0}, \quad \mathbf{p}\mathbf{e} = 1. \quad (5)$$

Как следует из системы (5), матрица  $D_0^{(R)} + D_1^{(R)}$  совпадает с инфинитезимальным генератором  $Q$  цепи Маркова  $\xi_t = \{n_t^{(R)}, n_t^{(R-1)}, \dots, n_t^{(1)}, v_t^{(R)}, v_t^{(R-1)}, \dots, v_t^{(1)}\}$ ,  $t \geq 0$ , описывающей функционирование тандема, т. е.  $Q = D_0^{(R)} + D_1^{(R)}$ . Таким образом, используя результаты анализа выходящих потоков со станций тандема, была построена матрица  $Q$  без трудоемкой работы, требующейся при прямом подходе к построению этой матрицы.

## 5. Вероятности потерь

Рассчитав стационарные распределения тандема и его фрагментов, можно найти ряд важных стационарных характеристик производительности системы. Важнейшими из них являются вероятности потерь на станциях тандема.

**Теорема 4.** Вероятность потери  $P_{loss}^{(r)}$  произвольного запроса на  $r$ -й станции тандема определяется как

$$P_{loss}^{(r)} = \frac{\tilde{\lambda}_r - \lambda_r}{\tilde{\lambda}_r}, \quad r = 1, 2, \dots, R. \quad (6)$$

Здесь  $\tilde{\lambda}_r$  – интенсивность суммарного  $MAR$ -потока, поступающего на  $r$ -ю станцию, вычисляется по формуле

$$\tilde{\lambda}_r = \boldsymbol{\theta}^{(r)}\tilde{D}_1^{(r)}\mathbf{e},$$

где вектор  $\boldsymbol{\theta}^{(r)}$  – единственное решение системы

$$\boldsymbol{\theta}^{(r)}(\tilde{D}_0^{(r)} + \tilde{D}_1^{(r)}) = \mathbf{0}, \quad \boldsymbol{\theta}^{(r)}\mathbf{e} = 1;$$

$\lambda_r$  – интенсивность выходящего потока с  $r$ -й станции – вычисляется по формуле

$$\lambda_r = \boldsymbol{\theta}^{(r)}D_1^{(r)}\mathbf{e},$$

где вектор  $\boldsymbol{\theta}^{(r)}$  – единственное решение системы

$$\boldsymbol{\theta}(D_0^{(r)} + D_1^{(r)}) = \mathbf{0}, \quad \boldsymbol{\theta}^{(r)}\mathbf{e} = 1.$$

Доказательство. Согласно эргодической теореме для цепей Маркова [13] вероятность потери запроса на отдельной станции тандема может быть вычислена как отношение разности

интенсивности входящего и выходящего потоков на этой станции к интенсивности входящего потока. Отсюда непосредственно следует доказательство теоремы.

**Теорема 5.** Вероятность потери на  $r$ -й станции тандема произвольного запроса, поступившего с  $(r - 1)$ -й станции, вычисляется как

$$P_{loss/1}^{(r)} = \frac{\theta^{(r)}(D_1^{(r-1)} \otimes I_{W_{r+1}})e}{\lambda_{r-1}}, r = 1, 2, \dots, R, \quad (7)$$

где  $D_1^{(0)} = D_1$ ,  $\lambda_0$  – интенсивность входящего потока в тандем.

Вероятность потери на  $r$ -й станции тандема произвольного запроса из дополнительного потока находится по формуле

$$P_{loss/2}^{(r)} = \frac{\theta^{(r)}(I_{K_r(N_r+1)} \otimes H_1^{(r)})e}{h_r}, r = 2, \dots, R. \quad (8)$$

**Доказательство.** Числитель правой части (7) есть интенсивность потока запросов, поступающих на  $r$ -ю станцию из  $(r - 1)$ -й станции и застающих все приборы  $r$ -й станции занятыми, а знаменатель – интенсивность потока всех запросов, поступающих на  $r$ -ю станцию из  $(r - 1)$ -й станции. По известным эргодическим соображениям отношение этих двух интенсивностей определяет искомую вероятность  $P_{loss/1}^{(r)}$ . Аналогичные рассуждения приводят к формуле (8) для вероятности  $P_{loss/2}^{(r)}$ .

Используя теорему 5, можно получить альтернативное выражение для вероятности суммарных потерь  $P_{loss}^{(r)}$  на  $r$ -й станции, ранее определенной формулой (6). Альтернативная формула приведена в следующем утверждении.

**Следствие 4.** Вероятность того, что произвольный запрос из суммарного потока на  $r$ -ю станцию принадлежит выходящему потоку из  $(r - 1)$ -й станции и будет потерян из-за отсутствия свободных приборов на  $r$ -й станции, вычисляется как

$$P_{loss,1}^{(r)} = P_{loss/1}^{(r)} \frac{\lambda_{r-1}}{\lambda_r}, r = \overline{1, R}. \quad (9)$$

Вероятность того, что произвольный запрос из суммарного потока на  $r$ -ю станцию принадлежит дополнительному потоку и будет потерян из-за отсутствия свободных приборов на станции, вычисляется следующим образом:

$$P_{loss,2}^{(r)} = P_{loss/2}^{(r)} \frac{h_r}{\lambda_r}, r = \overline{2, R}. \quad (10)$$

Вероятность  $P_{loss}^{(r)}$  потери произвольного запроса на  $r$ -й станции может быть вычислена как

$$P_{loss}^{(r)} = P_{loss,1}^{(r)} + P_{loss,2}^{(r)}, r = \overline{1, R}, \quad (11)$$

где  $P_{loss,2}^{(1)} = 0$ .

**Доказательство.** Формулы (9)–(11) выводятся из очевидных вероятностных соображений.

**Следствие 5.** В случае  $R = 2$  вероятность того, что запрос из входящего потока на первую станцию не будет потерян в системе, определяется как

$$P_{succ} = (1 - P_{loss/1}^{(1)})(1 - P_{loss/1}^{(2)}). \quad (12)$$

### Заключение

Полученные в статье результаты дают простой элегантный способ для построения инфинитезимального генератора цепи Маркова, описывающей функционирование тандема и его фрагментов. Однако этот способ не приводит к уменьшению размера системы линейных алгебраических уравнений, которую необходимо решить для вычисления стационарного распределения состояний целого тандема. Система (5) имеет тот же ранг  $K_R$ , что и система (1). Если даже такие алгоритмы, как численно устойчивый алгоритм 2 (см. разд. 3), который эффективно использует разреженную структуру генератора, не дают возможности решить систему (5), могут быть использованы своего рода эвристики. Например, когда рекуррентно вычисляются матрицы  $D_0^{(r)}$  и  $D_1^{(r)}$ , определяющие *MAP*-поток на  $r$ -ю станцию, и порядок этих матриц становится слишком большим для некоторого  $r \in \{1, \dots, R-1\}$ , то можно попытаться аппроксимировать такой *MAP* *MAP*-поток с той же интенсивностью, некоторым количеством совпадающих моментов длин интервалов между поступлениями запросов (по крайней мере, с тем же коэффициентом вариации) и тем же коэффициентом корреляции, но с гораздо меньшей размерностью пространства состояний управляющего процесса [14–16]. После этого можно продолжать рекуррентную процедуру расчета матриц  $D_0^{(r')}$  и  $D_1^{(r')}$ ,  $r' > r$ , исходя из матриц, которые определяют аппроксимирующий *MAP*.

### Список литературы

1. Balsamo, S. A review on queueing network models with finite capacity queues for software architectures performance prediction / S. Balsamo, V.D.N. Persone, P. Inverardi // Performance Evaluation. – 2003. – Vol. 51. – P. 269–288.
2. Gnedenko, B.W. Handbuch der Bedienungstheorie / B.W. Gnedenko, D. Konig. – Berlin : Akademie Verlag, 1983.
3. Perros, H.G. A bibliography of papers on queueing networks with finite capacity queues / H.G. Perros // Performance Evaluation. – 1989. – Vol. 10. – P. 255–260.
4. Heyman, D.P. Modelling multiple IP traffic streams with rate limits / D.P. Heyman, D. Lucantoni // IEEE/ACM Transactions on Networking. – 2003. – Vol. 11. – P. 948–958.
5. Klemm, A. Modelling IP traffic using the batch Markovian arrival process / A. Klemm, C. Lindermann, M. Lohmann // Performance Evaluation. – 2003. – Vol. 54. – P. 149–173.
6. Bromberg, M.A. Multi-phase systems with losses with exponential servicing / M.A. Bromberg // Automation and Remote Control. – 1979. – Vol. 40. – P. 27–31.
7. Bromberg, M.A. Service by a cascaded network of instruments / M.A. Bromberg, V.A. Kokotushkin, V.A. Naumov // Automation and Remote Control. – 1977. – Vol. 38. – P. 60–64.
8. Lucantoni, D.M. New results on the single server queue with a batch Markovian arrival process / D.M. Lucantoni // Communications in Statistics-Stochastic Models. – 1991. – Vol. 7. – P. 1–46.
9. Graham, A. Kronecker Products and Matrix Calculus with Applications / A. Graham. – Cichester : Ellis Horwood, 1981.
10. Klimenok, V.I. Calculation of characteristics of a multiserver queue with rejections and burst-like traffic / V.I. Klimenok // Automatic Control and Computer Sciences. – 1999. – Vol. 33, no. 6. – P. 35–43.
11. Lack of invariant property of Erlang loss model in case of the *MAP* input / V. Klimenok [et al.] // Queueing Systems. – 2005. – Vol. 49. – P. 187–213.
12. Kemeni, J.G. Denumerable Markov Chains / J.G. Kemeni, J.L. Snell, A.W. Knapp. – N. Y. : Van Nostrand, 1966.
13. Skorokhod, A. Probability theory and random processes / A. Skorokhod. – Kiev : High School, 1980.
14. Alfa, A.S. On approximating higher order *MAPs* with *MAPs* of order two / A.S. Alfa, J.E. Diamond // Queueing Systems. – 2000. – Vol. 34. – P. 269–288.

15. Heindl, A. Correlation bounds for second order MAPs with application to queueing network decomposition / A. Heindl, K. Mitchell, A. van de Liefvoort // Performance Evaluation. – 2006. – Vol. 63. – P. 553–577.

16. Heindl, A. Output models of  $MAP/PH/1(K)$  queues for an efficient network decomposition / A. Heindl, M. Telek // Performance Evaluation. – 2002. – Vol. 49. – P. 321–339.

Поступила 04.07.2017

Белорусский государственный университет,  
Минск, пр. Независимости, 4  
e-mail: klimenok@bsu.by

**V.I. Klimenok**

### **STATIONARY DISTRIBUTION OF A TANDEM QUEUE WITH ADDITIONAL FLOWS ON THE STATIONS OF THE TANDEM**

A tandem queueing system consisting of a finite number of multi-server stations without buffers is analyzed. The input flow at the first station is a  $MAP$  (Markovian arrival process). The customers from this flow aim to be served at all stations of the tandem. For any station, besides transit customers proceeding from the previous station, an additional  $MAP$  flow of new customers arrives at this station directly. Customers from this flow aim to be served at this station and all subsequent stations of the tandem. The service times of customer at the stations are exponentially distributed with the service rate depending of number of the station. The algorithms for calculation of stationary distributions and the loss probabilities associated with the tandem are given.

УДК 004.94

И.Н. Сьюльжин<sup>1</sup>, С.Г. Бильчинская<sup>2</sup>, Ю.А. Чернявский<sup>3</sup>, Е.В. Шабинская<sup>4</sup>

## РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ РАСХОДОВ НА ПИТАНИЕ В ДОМОХОЗЯЙСТВАХ РЕГИОНА КАК ФУНКЦИИ РАСПОЛАГАЕМОГО ЛИЧНОГО ДОХОДА И ЦЕНЫ

*С помощью метода множественного регрессионного анализа, широко используемого для описания и исследования некоторых процессов в экономике регионов, решается важная проблема разграничения эффектов различных независимых или частично зависимых переменных, зависящих от нескольких, в том числе коррелированных, факторов. Рассмотренная регрессионная модель включает спецификацию составляющих ее соотношений, выбор переменных, входящих в каждое соотношение, и определение соответствующих этим соотношениям математических функций. На основе официальной поквартальной статистической информации (за 2015 и 2016 гг.), представленной в интерполируемом ежемесячном варианте, сформирована регрессионная модель расходов на питание с двумя независимыми переменными как функции дохода и цены. Регрессионный анализ позволил конкретизировать зависимость расходов на питание в домохозяйствах республики от располагаемого личного дохода и относительной цены на продукты питания, что необходимо учитывать при решении задач социально-экономического развития региона.*

### Введение

В статье рассматривается зависимость общей величины расходов на продукты питания от располагаемого личного дохода с учетом влияния изменений относительной цены этих расходов, которую можно выразить следующим образом:

$$y = \alpha + \beta_1 x + \beta_2 p + u, \quad (1)$$

где  $y$  – общая величина расходов на питание;  $x$  – располагаемый личный доход за вычетом личных сбережений (равен потребительским расходам);  $p$  – индекс относительной цены продуктов питания;  $\alpha$ ,  $\beta_1$  и  $\beta_2$  – постоянные величины (параметры уравнения);  $u$  – случайный член.

В предположении истинности модели (1), в котором допущено упрощение в том плане, что расходы на питание не влияют на доходы и цену, для наблюдаемых (статистических) данных рассмотрим уравнение регрессионной зависимости

$$\hat{y} = a + b_1 x + b_2 p, \quad (2)$$

где величины  $a$ ,  $b_1$  и  $b_2$  являются оценками коэффициентов  $\alpha$ ,  $\beta_1$  и  $\beta_2$  исходного уравнения (1) соответственно.

### 1. Определение и анализ параметров регрессионной модели расходов домохозяйств на питание с двумя независимыми переменными как функции дохода и цены

Для уравнения (2) вычисляются и интерпретируются коэффициенты множественной регрессии  $a$ ,  $b_1$  и  $b_2$  с использованием статистических данных по экономике региона за 2015–2016 гг. для независимых переменных ( $x_i$  и  $p_i$ ) и зависимой переменной ( $y_i$ ) на том же временном интервале (номер месяца  $i = \overline{1, 24}$ ). В табл. 1 приведены данные, сформированные на основе официальной информации [1], при этом исходная поквартальная статистическая информация (за 2015 и 2016 гг.) представлена в интерполируемом ежемесячном варианте.

Процедура преобразования для каждого квартала исходных экономических данных в ежемесячные значения заключалась в следующем. Исходные данные  $n$ -го квартала отнесены к среднему (второму) месяцу квартала. Для первого и третьего месяца каждого квартала этот результат корректировался в большую или меньшую сторону в зависимости от того, в какой

мере исходные данные соседних  $(n-1)$ -го и  $(n+1)$ -го кварталов соотносятся с данными  $n$ -го квартала ( $n=2,7$ ).

Таблица 1

Статистические данные для экономики региона за 2015–2016 гг.

$y_i$	$x_i$	$p', \%$	$P_\Sigma$	$p_i = p' / P_\Sigma \times 100$	$x_i - \bar{x}$	$(x_i - \bar{x})^2$	$p_i - \bar{p}$	$(p_i - \bar{p})^2$
349,98	827,40	93,55	91,13	102,66	-111,79	12497,00	1,53	2,34
352,80	834,00	94,30	91,85	102,66	-105,19	11064,94	1,54	2,37
355,59	840,60	95,04	92,58	102,66	-98,59	9719,99	1,54	2,36
393,99	893,04	105,31	98,35	107,07	-46,15	2129,82	5,94	35,34
389,70	900,00	104,16	99,12	105,09	-39,19	1535,86	3,96	15,68
385,50	909,90	103,04	100,21	102,82	-29,29	857,90	1,70	2,88
383,28	937,56	102,45	103,26	99,21	-1,63	2,66	-1,91	3,66
381,00	931,98	101,84	102,64	99,21	-7,21	51,98	-1,91	3,65
379,20	927,57	101,36	102,16	99,21	-11,62	135,02	-1,91	3,65
371,61	914,01	99,33	100,66	98,67	-25,18	634,03	-2,45	6,02
374,13	907,98	100,00	100,00	100,00	-31,21	974,06	-1,13	1,27
376,59	905,58	100,66	99,74	100,92	-33,61	1129,63	-0,20	0,04
378,21	891,66	101,09	98,20	102,94	-47,53	2259,10	1,82	3,30
382,41	903,99	102,21	99,56	102,66	-35,20	1239,04	1,54	2,37
386,61	916,26	103,34	100,91	102,40	-22,93	525,78	1,28	1,63
403,29	950,76	107,79	104,71	102,94	11,57	133,86	1,82	3,31
416,19	990,99	111,24	109,14	101,92	51,80	2683,24	0,80	0,64
429,09	1031,28	114,69	113,58	100,98	92,09	8480,57	-0,15	0,02
393,00	1019,46	105,04	112,28	93,56	80,27	6443,27	-7,57	57,28
411,69	1014,00	110,04	111,68	98,53	74,81	5596,54	-2,59	6,72
415,41	1008,60	111,03	111,08	99,96	69,41	4817,75	-1,17	1,37
415,98	1012,02	111,19	111,46	99,76	72,83	5304,21	-1,37	1,88
424,89	1027,98	113,57	113,22	100,31	88,79	7883,66	-0,82	0,66
433,80	1043,94	115,95	114,97	100,85	104,75	10972,56	-0,28	0,08
<b>391,00</b>	<b>939,19</b>	<b>104,51</b>	<b>103,44</b>	<b>101,13</b>	<b>0,00</b>	<b>4044,69</b>	<b>0,00</b>	<b>6,60</b>

Примечание: полужирным шрифтом выделены средние значения данных.

Предположим, что наблюдаемая величина (среднемесячная) в  $n$ -м квартале  $\bar{z}_n$  ( $z_i$  – это  $x_i$  или  $y_i$ ) меньше по сравнению со значением  $\bar{z}_{n+1}$  этой величины в  $(n+1)$ -м квартале:  $\bar{z}_n = \bar{z}_{n+1} - \Delta z$ . Тогда наблюдения третьего месяца  $n$ -го квартала корректируются так:  $z_n^3 = (\bar{z}_n + \Delta z')$ , случайная величина  $\Delta z' < \Delta z$ . Скорректированное наблюдение первого месяца  $(n+1)$ -го квартала  $z_{n+1}^1 = \bar{z}_n - \Delta z'$ . Аналогичным образом осуществляются процедуры коррекции смежных пар наблюдений  $z_{n-1}^3$  и  $z_n^1$ .

При такой коррекции необходимо строго соблюдать исходные значения наблюдений  $\bar{z}_n$  и  $\bar{z}_{n+1}$ . В приведенном примере увеличение  $n$ -го квартального значения наблюдения на  $\Delta z'$  должно быть скомпенсировано уменьшением на соответствующую величину значений  $z_n^1$  либо  $z_n^2$ .

Данная коррекция, не нарушая исходные средние значения для каждого квартала, во-первых, вносит определенную случайную (как будет установлено далее, несущественную) составляющую в результаты наблюдений. Во-вторых, в определенной мере она сглаживает существенно различающиеся межквартальные экономические данные, которые реально в месяцах, расположенных на стыке кварталов, не могут значительно отличаться друг от друга.

В табл. 1 приведены также вычисленные выборочные месячные значения  $\bar{x}$ ,  $\bar{p}$  и  $\bar{y}$  и выборочные дисперсии  $\text{Var}(x)$ ,  $\text{Var}(p)$  и  $\text{Var}(y)$  по формулам  $\bar{z} = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} z_i$  и  $\text{Var}(z) = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} (z_i - \bar{z})^2$ , где  $z \in \{x, p, y\}$ .

Диаграмма потребительских расходов домохозяйств в регионе за период 2015–2016 гг. изображена на рис. 1.

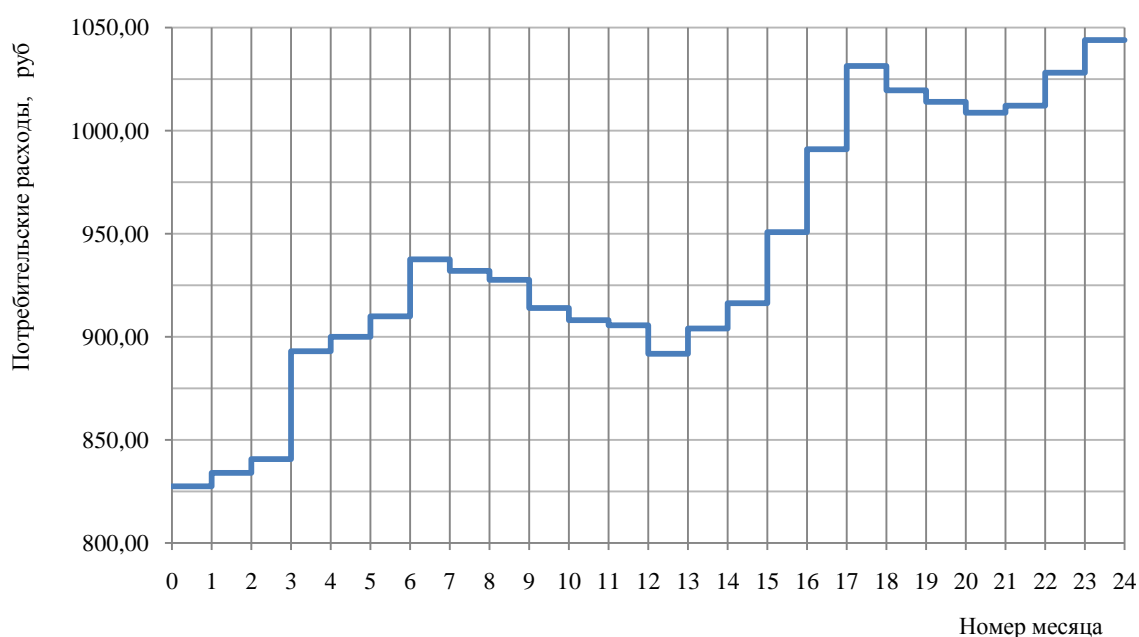


Рис. 1. Потребительские расходы домохозяйств в регионе за 2015–2016 гг.

Индекс относительной цены  $p_i$  вычисляется путем деления неявного дефлятора цен продуктов питания  $p'_i = \frac{y_i}{374,13} \times 100$  на неявный дефлятор общих расходов  $p^i_\Sigma = \frac{x_i}{907,98} \times 100$  и умножения полученного результата на 100:  $p = \frac{p'_i}{p^i_\Sigma} \times 100$ . Поскольку в ноябре 2015 г. переменные исходного уравнения  $y_{i=11} = 374,13$  и  $x_{i=11} = 907,98$ , для ноября 2015 г. дефлятор цен на продукты питания  $p'_{i=11} = 100$  и дефлятор общих расходов  $p^i_\Sigma = 100$  [2].

В табл. 2 приведены данные, необходимые для определения автокорреляционных зависимостей между всеми переменными в уравнении (2):

$$\text{Cov}(x, y) = \overline{x_i y_i} - \bar{x} \bar{y} = 1357,08; \text{Cov}(p, y) = \overline{p_i y_i} - \bar{p} \bar{y} = -9,29; \text{Cov}(x, p) = \overline{x_i p_i} - \bar{x} \bar{p} = -84,394.$$

Таблица 2

Месячные данные для определения автокорреляционных зависимостей между всеми переменными в уравнении (2)

$x_i p_i$	$x_i y_i$	$p_i y_i$	$y_i$	$e_i = y_i - \bar{y}$	$(e_i - \bar{e})^2$	$(y_i - \bar{y})^2$
84 937,01	289 573,45	35 927,31	350,34	0,36	0,13	1682,44
85 621,40	294 235,20	36 219,70	353,12	0,32	0,11	1459,05
86 298,51	298 908,95	36 505,93	355,88	0,29	0,08	1253,69
95 617,84	351 848,83	42 184,53	395,08	1,09	1,20	8,96
94 576,70	350 730,00	40 951,71	390,19	0,49	0,24	1,68
93 557,40	350 766,45	39 637,74	385,43	-0,07	0,00	30,22
93 018,62	359 348,00	38 026,56	382,81	-0,47	0,22	59,56
92 465,29	355 084,38	37 800,46	380,48	-0,52	0,27	99,95
92 028,44	351 734,54	37 622,16	378,64	-0,56	0,31	139,18
90 186,42	339 655,26	36 667,19	370,84	-0,77	0,59	375,88
90 798,00	339 702,56	37 413,00	373,55	-0,58	0,34	284,51
91 395,02	341 032,37	38 007,08	376,18	-0,41	0,17	207,58
91 788,18	337 234,73	38 933,23	378,29	0,08	0,01	163,52
92 807,48	345 694,82	39 259,85	382,35	-0,06	0,00	73,75
93 826,78	354 235,28	39 589,61	386,44	-0,17	0,03	19,25
97 874,87	383 432,00	41 516,22	402,97	-0,32	0,10	151,11
101 005,59	412 440,13	42 419,72	415,76	-0,43	0,18	634,66
104 136,30	442 511,94	43 328,53	428,86	-0,23	0,05	1451,04
95 377,58	400 647,78	36 767,89	394,78	1,78	3,16	4,01
99 913,48	417 453,66	40 565,46	412,05	0,36	0,13	428,18
100 816,29	418 982,53	41 523,00	415,38	-0,03	0,00	595,97
100 954,62	420 980,08	41 496,32	416,02	0,04	0,00	624,13
103 117,00	436 778,42	42 620,85	424,86	-0,03	0,00	1148,70
105 279,37	452 861,17	43 747,91	433,64	-0,16	0,03	1832,05
<b>94 891,59</b>	<b>368 578,02</b>	<b>39 530,50</b>	<b>391,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,31</b>	<b>530,38</b>

Примечание: полужирным шрифтом выделены средние значения данных.

С использованием данных табл. 1 и 2 получено следующее уравнение регрессии:

$$\hat{y} = -398,365 + 0,4175 x + 3,9284 p, \quad (3)$$

(с.о.) (7,64) (0,0022) (0,0549)

где с.о. – стандартные ошибки [3].

Величины  $a$ ,  $b_1$  и  $b_2$  уравнения вычислялись по формулам [4]

$$a = \bar{y} - b_1 \bar{x} - b_2 \bar{p} = -398,365; \quad (4)$$

$$b_1 = \frac{\text{Cov}(x, y) \text{Var}(p) - \text{Cov}(p, y) \text{Cov}(x, p)}{\text{Var}(x) \text{Var}(p) - (\text{Cov}(x, p))^2} = 0,4175; \quad (5)$$

$$b_2 = \frac{\text{Cov}(p, y) \text{Var}(x) - \text{Cov}(x, y) \text{Cov}(x, p)}{\text{Var}(p) \text{Var}(x) - (\text{Cov}(x, p))^2} = 3,9284. \quad (6)$$



На основании установленной регрессионной зависимости (3) можно прогнозировать специфику изменений затрат на питание следующим образом. В связи с тем что оба коэффициента  $b_1$  и  $b_2$  положительные, общая величина расходов на питание  $y$  возрастает при увеличении как располагаемого личного дохода  $x$ , так и индекса относительной цены на продукты питания  $p$ . Согласно рассматриваемой модели за два года (2015–2016 гг.) увеличение располагаемого личного дохода составило 216,54 (1043,94–827,40), а индекс цен  $p$  упал с 102,66 до 100,85, т. е. изменился на 1,8 пункта. Таким образом, совместное воздействие отмеченных факторов привело к увеличению затрат на питание за указанный период в размере  $b_1 \times 216,54 - b_2 \times 1,8 = 90,4 - 7,07 = 83,33$ . Полученный аналитически результат достаточно хорошо соответствует фактической разности расходов на питание  $y$  в конце рассматриваемого периода (декабрь 2016 г.) относительно начала (январь 2015 г.), т. е.  $433,80 - 349,98 = 83,82$ .

Предполагалось, что расходы на питание не влияют на доход и цену, что является определенным упрощением действительности. В реальности же чистый эффект воздействия на величину  $y$  будет зависеть не только от коэффициентов  $\beta_1$  и  $\beta_2$ , но также от размеров изменений  $x$  и  $p$  [5].

Диаграмма расходов домохозяйств на продукты питания в регионе за 2015–2016 гг. показана на рис. 2.

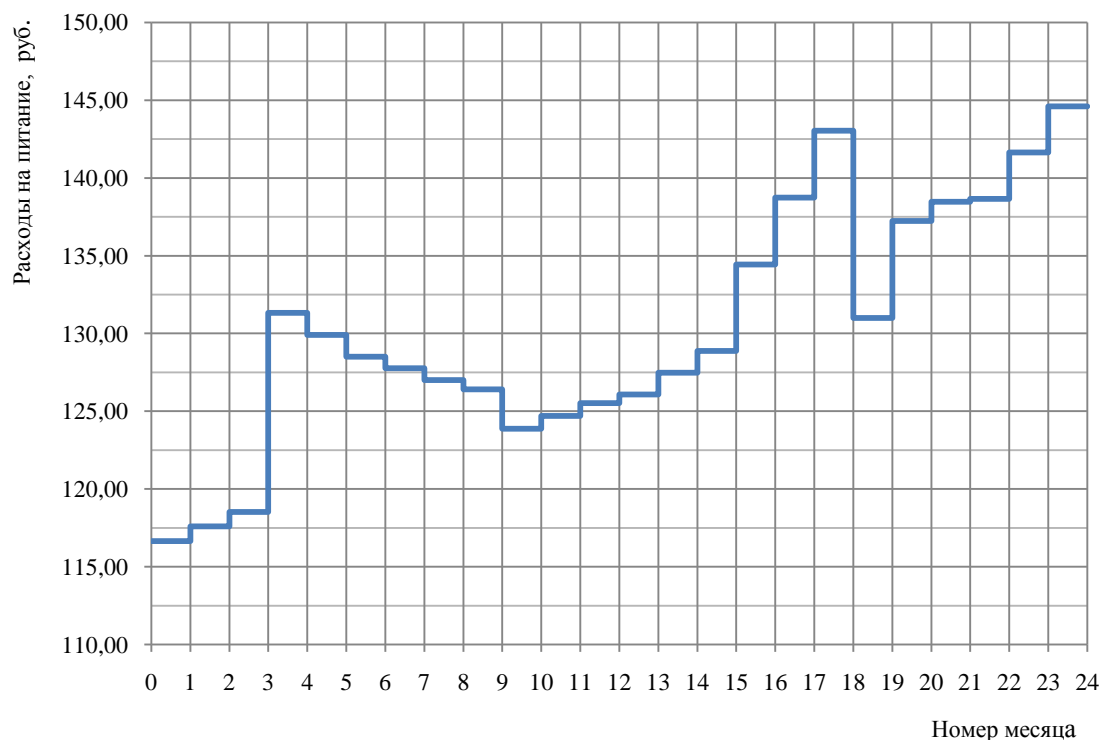


Рис. 2. Расходы домохозяйств на питание в регионе за 2015–2016 гг.

## 2. Оценка стандартных ошибок коэффициентов регрессии. Коэффициент детерминации $R^2$ , $t$ -тесты и доверительные интервалы

Стандартные ошибки коэффициентов регрессии  $b_1$  и  $b_2$  оценивались по формулам [4]

$$\text{с.о.}(b_1) = \sqrt{\frac{\text{Var}(e)}{(n-3)\text{Var}(x)} \times \frac{1}{1-r_{xp}^2}} = 0,0022; \quad (7)$$

$$\text{с.о.}(b_2) = \sqrt{\frac{\text{Var}(e)}{(n-3)\text{Var}(p)} \times \frac{1}{1-r_{xp}^2}} = 0,0549; \quad (8)$$

$$\text{с.о.}(a) = \sqrt{\frac{\text{Var}(e)}{(n-3)} \times \left(1 + \frac{(\bar{x})^2}{\text{Var}(x)}\right) \times \left(\frac{1}{1-r_{xp}^2}\right)} + \sqrt{\frac{\text{Var}(e)}{(n-3)} \times \left(1 + \frac{(\bar{p})^2}{\text{Var}(p)}\right) \times \left(\frac{1}{1-r_{xp}^2}\right)} = 7,64, \quad (9)$$

где разница между вычисленным регрессионным и наблюдаемым значениями зависимой переменной  $e_i = \hat{y}_i - y_i$ ; выборочная дисперсия ошибки

$$\text{Var}(e) = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} (e_i - \bar{e})^2 = 0,3067; \quad (10)$$

коэффициент корреляции

$$r_{x,p} = \frac{\text{Cov}(x, p)}{\sqrt{\text{Var}(x)\text{Var}(p)}} = 0,5164. \quad (11)$$

Коэффициент детерминации  $R^2$ , который оценивает долю дисперсии зависимой переменной  $y$ , обусловленную регрессией, определяется следующим образом:

$$R^2 = 1 - \frac{\text{Var}(e)}{\text{Var}(y)} = 0,9994. \quad (12)$$

В связи с тем что коэффициент  $R^2$  близок к единице, можно сделать заключение о достаточно точном соответствии линии регрессии статистическим данным. С учетом этого, а также не слишком тесной корреляции между переменными  $x$  и  $p$  ( $r_{x,p} = 0,5164$ ) результаты оценивания регрессии можно считать надежными.

Критический уровень  $t$ -тестов для коэффициентов множественной регрессии при любом уровне значимости зависит от числа степеней свободы, которое равно  $(n-k-1)$ : число наблюдений  $n=25$  минус число оцениваемых параметров  $k=2$  и минус постоянный член 1. В рассматриваемом случае при числе степеней свободы 22 и уровне значимости 5 % критическое значение  $t_{\text{крит}}=2,074$  [6]. Таким образом, гипотетические значения  $\beta_1$  и  $\beta_2$  будут совместимыми с результатом оценивания регрессии, когда удовлетворяются двойные неравенства

$$\begin{aligned} b_1 - \text{с.о.}(b_1) \times t_{\text{крит}} < \beta_1 < b_1 + \text{с.о.}(b_1) \times t_{\text{крит}}, \\ b_2 - \text{с.о.}(b_2) \times t_{\text{крит}} < \beta_2 < b_2 + \text{с.о.}(b_2) \times t_{\text{крит}}. \end{aligned} \quad (13)$$

Подставляя полученные в результате регрессионного анализа значения в неравенства (13), получаем

$$\begin{aligned} 0,413 < \beta_1 < 0,422, \\ 3,815 < \beta_2 < 4,042. \end{aligned} \quad (14)$$

Любые гипотетические значения  $\beta_1$  и  $\beta_2$ , которые удовлетворяют соотношениям (14), будут автоматически совместимы с оценками  $b_1$  и  $b_2$ ; иными словами, не будут ими опровергаться [6]. При условии выполнения четвертого условия Гаусса – Маркова, т. е. когда объясняющие (независимые) переменные не являются стохастическими (не имеют случайной составляющей), математическое ожидание величины  $b_1$  находится из выражения [4]

$$\bar{b} = \beta_1 + \beta_2 \frac{\text{Cov}(x, p)}{\text{Var}(x)}. \quad (15)$$

Таким образом, оценка  $b_1$  будет смещена относительно значения  $\beta_1$  на величину  $\beta_2 \frac{\text{Cov}(x, p)}{\text{Var}(x)} = 3,9284 \times \frac{-84,394}{4044,69} = -0,08$ , т. е. выражение (15) будет в среднем давать несколько заниженную оценку  $\beta_1$ . Оценка  $b_1$  будет несмещенной только в исключительном случае, когда  $\text{Cov}(x, p) = 0$ .

В неравенствах (14) обозначены границы доверительных интервалов для величин  $\beta_1$  и  $\beta_2$ . Относительно небольшой доверительный интервал для коэффициента  $\beta_1$  обусловлен значительной дисперсией потребительских расходов домохозяйств  $\text{Var}(x) = 4044,687$  при среднем значении  $\bar{x} = 939,19$ .

Дополнительно для проверки качества оценивания регрессии, т. е. проверки того, действительно ли полученное при оценке регрессии значение коэффициента  $R^2 = 0,9994$  отражает истинную зависимость или оно появилось случайно, определим  $F$ -статистику [4, 6]. С этой целью вначале разложим выборочную дисперсию  $\text{Var}(y)$  зависимой переменной на «объясненную»  $\text{Var}(\hat{y})$  и «необъясненную»  $\text{Var}(e)$  составляющие:

$$\text{Var}(y) = \text{Var}(\hat{y}) + \text{Var}(e). \quad (16)$$

Сравнивая значение выборочной дисперсии зависимой переменной  $\text{Var}(y) = 530,3772$  со значениями «объясненной»  $\text{Var}(\hat{y}) = 530$  и «необъясненной»  $\text{Var}(e) = 0,3067$  составляющих ошибок, можно сделать заключение о хорошем соответствии полученных результатов уравнению (16). В связи с незначительностью «необъясненной»  $\text{Var}(e) = 0,3067$  составляющей ошибок отсутствует необходимость анализировать их особенности.

Используя определение выборочной дисперсии и умножая обе части уравнения (16) на число  $n$ , получим уравнение, связывающее общую сумму квадратов отклонений  $TSS$  зависимой переменной  $y$  от ее выборочного среднего значения, «объясненную» сумму квадратов отклонений  $ESS$  и «необъясненную» сумму квадратов отклонений  $RSS$ :

$$TSS = ESS + RSS. \quad (17)$$

Для определения качества оценивания регрессии используем  $F$ -статистику, которую запишем как отношение «объясненной» суммы квадратов отклонений  $ESS$  в расчете на одну независимую переменную к «необъясненной» (остаточной) сумме квадратов  $RSS$  в расчете на одну степень свободы:

$$F = \frac{ESS / k}{RSS / (n - k - 1)}. \quad (18)$$

Учитывая равенство коэффициента  $R^2 = ESS / TSS$ ,  $F$ -статистику определим следующим образом:

$$F = \frac{R^2 / k}{(1 - R^2) / (n - k - 1)} = 4997. \quad (19)$$

Критический уровень  $F$  с 22 степенями свободы при уровне значимости в 5 % составляет  $F_{\text{крит}} = 3,44$  [4]. Таким образом, соответствующая выполненному регрессионному анализу  $F$ -статистика, равная 4997, указывает на значимый уровень обоснования полученных результатов.

### Заключение

В результате выполненного в работе регрессионного анализа зависимости затрат на продукты питания от двух факторов: располагаемого личного дохода домохозяйств региона и относительного индекса цен – определены оптимальные оценки коэффициентов регрессии, которые обеспечивают хорошее соответствие между неизвестными (на момент наблюдения) фактическими значениями затрат на продукты питания и значениями, прогнозируемыми по уравнению регрессии. Определены стандартные ошибки коэффициентов регрессии, коэффициент детерминации  $R^2$ ,  $F$ -статистика,  $t$ -тесты и обозначены границы доверительных интервалов для коэффициентов множественной регрессии. Установлено пренебрежимо малое значение «необъясненной» составляющей ошибок по сравнению с «объясненной» составляющей. Математические выкладки и полученные результаты могут использоваться для оценки эффективности функционирования системы управления развитием экономики региона и его прогнозирования.

### Список литературы

1. Национальный статистический комитет Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/solialnaya-sfera/uroven-zhizni-naseleniya/operativnaya-informatsiya\\_7/potrebitelskie-rashody-domashnih-hozyaistv\\_2/](http://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/solialnaya-sfera/uroven-zhizni-naseleniya/operativnaya-informatsiya_7/potrebitelskie-rashody-domashnih-hozyaistv_2/). – Дата доступа : 01.03.2017.
2. Сюзьжин, И.Н. Анализ взаимосвязей между компонентами СППР / И.Н. Сюзьжин // Материалы Третьей Междунар. науч.-практ. конф. «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния», Минск, Беларусь, 28–29 апреля 2015 / НИУ «Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко» БГУ. – Минск, 2015. – С. 197–199.
3. Регрессионный двухкомпонентный анализ инфляционной составляющей в системных показателях экономической деятельности регионов / С.Г. Бильчинская [и др.] // Вестник КамчатГТУ. – 2016. – № 38. – С. 90–99.
4. Доугерти, К. Введение в эконометрику / К. Доугерти ; пер. с англ. – М. : ИНФРА-М, 1999. – XIV. – 402 с.
5. Макконнелл, К.Р. Экономикс: принципы, проблемы и политика / К.Р. Макконнелл, С.Л. Брю ; пер. с 13-го англ. изд. – М. : ИНФРА-М, 1999. – XXXIV. – 974 с.
6. Harvey, A. The Econometric Analysis of Time Series / A. Harvey. – Oxford : Philip. Allan, 1981. – XVII. – 410 с.

Поступила 09.06.2017

<sup>1</sup> Белорусский государственный университет,  
Минск, ул. Курчатова, 5;

<sup>2</sup> Академия управления при Президенте Республики Беларусь,  
Минск, ул. Московская, 13;

<sup>3</sup> Институт информационных технологий Белорусского  
государственного университета информатики и радиоэлектроники,  
Минск, ул. Козлова, 28;

<sup>4</sup> НИУ «Институт прикладных  
физических проблем им. А.Н. Севченко» БГУ,  
Минск, ул. Курчатова, 7  
e-mail: [ivan.syulzhin@yandex.ru](mailto:ivan.syulzhin@yandex.ru),  
[shabinskaya@rambler.ru](mailto:shabinskaya@rambler.ru)

**I.N. Siulzhyn, S.G. Bilchinskaya, Yu.A. Chernyavskiy, E.V. Shabinskaya**

**REGRESSIONAL ANALYSIS OF CONSUMER NUTRITION SPENDINGS  
IN THE HOUSEHOLDS OF THE REGION AS FUNCTION OF PERSONAL  
INCOME AND PRICE**

The multiple regression analysis method is widely used to describe and investigate some processes of the regional economy and may be also used to solve an important problem of distinguishing the effects of various independent or partially dependent variables. The regression model considered includes the specification of its constituent relationships, the choice of variables included in each relation, and the definition of mathematical functions corresponding to these relations. Regression model of food expenditure with two independent variables - expenditure as a function of income and price is based upon the official quarterly averaged statistical information (2015 and 2016 years). All the data are presented in the interpolated monthly version. Regression analysis made it possible to specify the dependence of expenditure on food in the country's households on the disposable personal income and the relative price of foodstuffs, which must be taken into account when solving problems of the region's social and economic development.

## ПРИКЛАДНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.87; 681.5

А.Г. Стрижнев

СПОСОБ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОДЪЕМА  
И ГОРИЗОНТИРОВАНИЯ ОПОРНОЙ ПЛАТФОРМЫ

*Описывается способ автоматического подъема и горизонтирования опорной платформы. Определяется состав элементов, необходимый для реализации системы в соответствии с предложенным способом. Система обеспечивает подъем и горизонтирование в четыре этапа, в процессе которых происходит определение ее возможностей, оценка состояния грунта, контроль и коррекция текущего состояния опорной платформы с выдачей параметров контроля на пульт управления. Способ можно использовать не только в статических, но и динамических системах горизонтирования типа активной подвески. Для реализации управления требуется определение динамических свойств опорных агрегатов по усилию и положению. Для исключения опасных перекосов платформы при ее подъеме осуществляется синхронизация движения опор. Даются рекомендации по реализации системы и экспериментальному определению параметров пространственной модели опорной платформы.*

**Введение**

Различные колесные и гусеничные машины содержат опорные платформы с расположенным на них оборудованием (подъемными кранами, бурильными установками, системами оптического наблюдения, радиолокационными станциями, пусковыми ракетными установками и др.), которые требуют применения систем подъема и горизонтирования (СПГ). Подъем опорной платформы обеспечивает разгрузку элементов ходовой части (рессор, осей, колес), а горизонтирование необходимо для качественной работы специального оборудования. Обычно эти задачи решают с помощью гидравлических опор, но при небольшой массе опорной платформы могут использоваться и электромеханические опоры [1].

Независимо от типа опор горизонтирование платформы можно осуществить только при наличии трех и более (обычно четырех) опорных агрегатов [2, 3]. При этом обязательным элементом любой СПГ является двухкоординатный (крена и тангажа) датчик наклона, а иногда и измеритель высоты подъема опорной платформы над поверхностью земли. Для снижения влияния скорости перемещения опор на работу датчиков их обычно устанавливают вблизи центра массы. При больших размерах и низкой жесткости платформы происходит ее «скручивание» и тогда используют два двухкоординатных датчика наклона, разнесенных по продольной оси. В некоторых случаях применяют два однокоординатных датчика наклона, которые устанавливают по диагонали платформы [3].

Существует большое разнообразие методов и способов подъема и горизонтирования [1–5] опорных платформ различного назначения, однако сложность конструкции и отсутствие единого подхода ограничивают их применение. В связи с этим возникла необходимость разработки нового способа автоматического подъема и горизонтирования опорной платформы.

**1. Общие сведения о способе автоматического подъема и горизонтирования**

Предлагаемый способ автоматического подъема и горизонтирования позволяет решить задачи определения возможности подъема и горизонтирования; оценки проседания грунта; подъема, горизонтирования, контроля и коррекции текущего состояния опорной платформы; выдачи параметров контроля на пульт управления; аварийной защиты элементов системы. С учетом выполняемых задач согласно предлагаемому способу автоматическая СПГ должна содержать необходимый состав оборудования; иметь запас хода опор, достаточный для подъема платформы на заданную высоту и обеспечения требуемого диапазона углов наклона платформы по крену и тангажу; иметь опорные и базовые поверхности, исключающие ухудшение точности горизонтирования платформы в процессе работы специального оборудования, а также выполнять различные диагностические и защитные функции элементов системы.

При использовании четырех гидравлических опор согласно способу автоматическая СПГ, отвечающая требованиям по назначению, должна содержать необходимый набор элементов и соответствовать структурной схеме, изображенной на рис. 1.

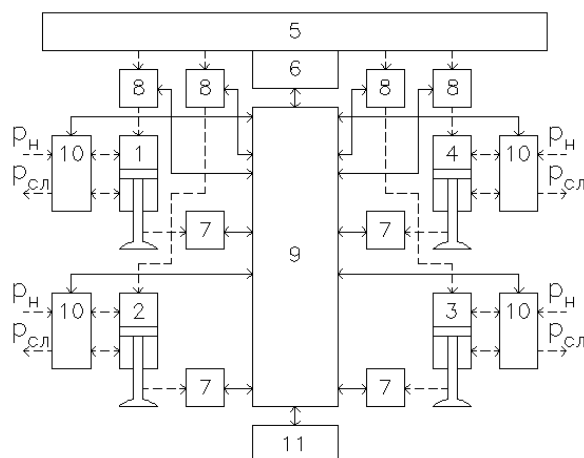


Рис. 1. Структурная схема автоматической СПГ

В состав системы (рис. 1) входят гидравлические опоры 1–4, присоединенные к опорной платформе 5. На платформе расположен двухкоординатный датчик наклона 6, измерительные оси которого параллельны продольной и поперечной осям платформы 5. Каждый из гидроцилиндров опор 1–4 оборудован датчиком положения штока 7 и датчиком усилия 8, приложенного к гидроцилиндру. Датчики 6–8 своими выходами соединены с информационными входами блока управления (БУ) 9, входящего в состав системы управления. Управляющими выходами БУ связан с четырехсекционным электрогидрораспределителем 10, выходы которого подключены к гидроцилиндрам опор 1–4. Включение и отключение системы осуществляется с пульта управления 11, выход которого является управляющим входом БУ. Следует заметить, что вместо датчиков усилия 8 можно использовать датчики давления, устанавливаемые в поршневой полости гидроцилиндров.

При реализации автоматической СПГ предлагаемым способом нужно использовать параметры пространственной модели опорной платформы.

## 2. Пространственная модель опорной платформы

Рассмотрим пространственную модель опорной платформы [4] (рис. 2). Она включает в себя продольную  $L$  и поперечную  $Q$  оси, пересекающиеся в центре масс (ЦМ), который в общем случае находится выше или ниже плоскости крепления гидроцилиндров опор 1–4 (опорной плоскости). Гидроцилиндры опор 1–4 удалены от поперечной оси  $Q$  на расстояния  $a$  и  $a_1$ , а от продольной оси  $L$  – на  $b$  и  $b_1$ . С изменением загруженности платформы положение ЦМ изменяется, и поэтому эти расстояния должны быть определены как можно точнее, например, путем измерения опорных усилий  $p_1 - p_4$  в статическом и динамическом положениях для соответствующего состояния загруженности.

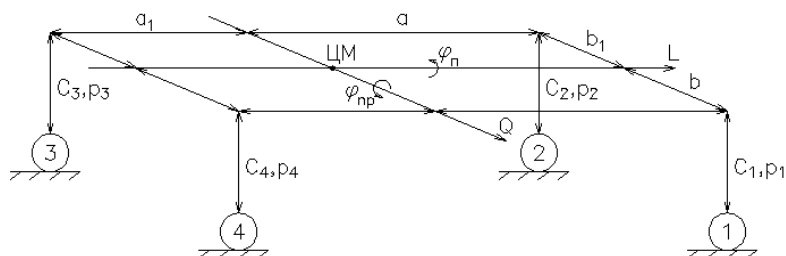


Рис. 2. Пространственная модель опорной платформы: 1–4 – опоры;  $c_i, p_i$  – ординаты, усилия опор;  $L, Q$  – продольная, поперечная оси;  $\varphi_{пр}, \varphi_{п}$  – продольный и поперечный углы наклона

Текущие длины выдвижения штоков из гидроцилиндров опор характеризуются ординатами  $c_1 - c_4$ , исчисляемыми от плоскости крепления гидроцилиндров опор до нижней поверхности подпятников, находящихся на поверхности земли, которая в общем случае не является горизонтальной.

Угловое положение плоскости шасси характеризуется продольным  $\varphi_{пр}$  и поперечным  $\varphi_{п}$  углами наклона осей  $L$  и  $Q$  платформы относительно горизонта. При этом положительные углы  $\varphi_{пр}$  и  $\varphi_{п}$  образуются при подъеме передней и правой боковой сторон платформы соответственно.

### 3. Реализация способа автоматического подъема и горизонтирования

Реализацию способа рассмотрим с использованием структурной схемы автоматической СПГ (см. рис. 1) и пространственной модели опорной платформы (см. рис. 2). При работе СПГ в отличие от аналогичных [1–5] определяются необходимые параметры горизонтирования и запретные сигналы. В процессе функционирования СПГ последовательно выполняются следующие практические операции.

Включение в работу автоматической СПГ осуществляется оператором путем перевода тумблера на пульте управления 11 в положение включения, после чего подается питание на все элементы системы. В дальнейшем блок БУ все манипуляции с гидроцилиндрами опор 1–4 выполняет поэтапно в автоматическом режиме.

*Этап 1.* Производится оценка данных датчика наклона 6 (см. рис. 1) и принятие решения о возможности работы системы в автоматическом режиме. При наклонах осей платформы, не позволяющих осуществить работу системы, БУ формирует сигнал «Запрет 1», который выдается на пульт 11, и дальнейшие подъем и горизонтирование платформы не выполняются.

Условием работы системы в автоматическом режиме (см. рис. 2) является не превышение текущих углов  $\varphi_{пр.1}$ ,  $\varphi_{п.1}$  расчетных значений:

$$|\varphi_{пр.1}| \leq \arcsin \frac{h_0 - h_3 - h_T - h_{п} - h_p}{A}; \quad |\varphi_{п.1}| \leq \arcsin \frac{h_0 - h_3 - h_T - h_{п} - h_p}{B},$$

где  $\varphi_{пр.1}$ ,  $\varphi_{п.1}$  – углы наклона опорной платформы, измеренные на этапе 1;  $A$ ,  $B$  – базовые расстояния между опорами ( $A = a + a_1$ ,  $B = b + b_1$ );  $h_0$  – полный ход штока гидроцилиндра опоры;  $h_3$  – ход опоры до поверхности земли;  $h_T$  – запас хода на глубину проседания грунта;  $h_{п}$  – требуемая высота подъема опорной платформы над поверхностью земли;  $h_p$  – запас хода для проведения точного горизонтирования.

Следует заметить, что величины  $A$ ,  $B$ ,  $h_0$ ,  $h_3$ ,  $h_T$ ,  $h_{п}$ ,  $h_p$  заранее определены, а текущие значения углов  $\varphi_{пр.1}$ ,  $\varphi_{п.1}$  измеряются двухкоординатным датчиком наклона. Так, например, для значений  $A = 5300$  мм,  $B = 4870$  мм,  $h_0 = 1100$  мм,  $h_3 = 150$  мм,  $h_T = 100$  мм,  $h_{п} = 160$  мм,  $h_p = 100$  мм определены условия  $|\varphi_{пр.1}| \leq 6,392^\circ$ ,  $|\varphi_{п.1}| \leq 6,959^\circ$ .

*Этап 2.* Если сигнал «Запрет 1» не сформирован, выполняется выдвижение штоков из гидроцилиндров опор 1–4 (см. рис. 1) и создаются начальные (расчетные) давления на грунт (недостаточные для подъема платформы), которые контролируются датчиками усилия 8. После обработки данных с датчика наклона 6 и датчиков положения штоков 7 гидравлических опор оценивается проседание грунта и определяются возможности СПГ. При проседании грунта и выдвижении штоков из гидроцилиндров опор 1–4 на величину, не позволяющую осуществить дальнейшую работу системы, БУ формирует сигнал «Запрет 2», который выдается на пульт 11, и подъем и горизонтирование платформы не выполняются. Условием проведения подъема и горизонтирования после создания начальных усилий  $p_1 \approx p_2 \approx p_3 \approx p_4 = p_0$  (см. рис. 2) является не превышение текущих значений ординат  $c_{i,2} \leq h_3 + h_T$  и углов наклона  $\varphi_{пр.2}$ ,  $\varphi_{п.2}$ , при ко-



торых реализуются возможности пространственной модели:  $|\varphi_{пр.2}| \leq \arcsin \frac{h_0 - h_{п} - h_{р} - c_{i.2}}{A}$ ,  $|\varphi_{п.2}| \leq \arcsin \frac{h_0 - h_{п} - h_{р} - c_{i.2}}{B}$ . В двойном индексе при ординате  $i$  означает номер опор, вторая цифра – номер этапа (1–4). Для расчета нужно использовать большее из четырех возможных значений  $c_{i.2}$ , измеренных в конце этапа 2 работы. При проседании грунта больше ожидаемого ( $c_{i.2} \geq h_3 + h_r$ ) возможности СПГ снижаются. Например, если  $c_{i.2} = 300$  мм, то предельные значения углов должны удовлетворять другим условиям:  $|\varphi_{пр.2}| \leq 6,065^\circ$ ,  $|\varphi_{п.2}| \leq 6,603^\circ$ . Следует заметить, что предельные значения координат ( $c_{i.2}, \varphi_{пр.2}, \varphi_{п.2}$ ), при которых горизонтирование невозможно, могут быть установлены заранее.

**Этап 3.** Если сигнал «Запрет 2» не сформирован, осуществляется выдвигание штоков гидроцилиндров опор 1–4 (см. рис. 1) на высоту разгрузки элементов ходовой части и одновременно выполняется горизонтирование платформы. Для исключения опасных перекосов платформы при подъеме используется синхронизация движения опор. Проводится оценка проседания грунта, при невозможности точного горизонтирования БУ формирует сигнал «Запрет 3», и работа системы прекращается.

При работе системы (см. рис. 2) используются данные ( $\varphi_{пр.2}, \varphi_{п.2}, c_{i.2}$ ), полученные на этапе 2 работы, по которым рассчитываются и запоминаются отклонения продольного и поперечного углов наклона платформы от требуемых значений:  $\Delta\varphi_{пр.3} = \varphi_{пр.2} - \varphi_{пр.тр}$ ,  $\Delta\varphi_{п.3} = \varphi_{п.2} - \varphi_{п.тр}$ . При этом измеренные на этапе 2 значения углов  $\varphi_{пр.2}, \varphi_{п.2}$  не должны превышать требуемых значений наклона платформы  $\varphi_{пр.тр}, \varphi_{п.тр}$ , которые задаются оператором. Затем определяются приращения ординат  $\Delta g_{1.3} = |A \sin \Delta\varphi_{пр.3}|$ ,  $\Delta g_{2.3} = |B \sin \Delta\varphi_{п.3}|$  и формируются задания  $q_{i.3} = c_{i.2} + h_{п} + k_1 \Delta g_{1.3} + k_2 \Delta g_{2.3}$  для гидроцилиндров опор 1–4. Здесь приняты следующие обозначения:  $h_{п}$  – требуемая высота подъема платформы;  $k_1, k_2$  – коэффициенты, которые могут принимать значения «ноль» или «единица». Для определения коэффициентов была составлена таблица.

Зависимость значений коэффициентов задания от величины отклонений углов наклона

Параметр		Номер опор				Параметр		Номер опор			
Условия	Коэффиц.	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	Условия	Коэффиц.	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$
$\Delta\varphi_{пр} \geq 0$	$k_1$	0	0	1	1	$\Delta\varphi_{п} \geq 0$	$k_2$	0	1	1	0
$\Delta\varphi_{пр} < 0$		1	1	0	0	$\Delta\varphi_{п} < 0$		1	0	0	1

При отсутствии наклона платформы ( $\Delta\varphi_{пр.3} = 0^\circ$ ,  $\Delta\varphi_{п.3} = 0^\circ$ ,  $c_{i.2} = h_3 + h_r = 250$  мм,  $h_{п} = 160$  мм) получим задания в виде  $q_{i.3} = c_{i.2} + h_{п} = 410$  мм, при наклоне платформы ( $\Delta\varphi_{пр.3} = 1^\circ$ ,  $\Delta\varphi_{п.3} = 0^\circ$ ,  $A = 5300$  мм,  $B = 4870$  мм,  $\Delta g_{1.3} = |A \sin 1^\circ| = 92,498$  мм,  $\Delta g_{2.3} = |B \sin 0^\circ| = 0$  мм,  $c_{i.2} = h_3 + h_r = 250$  мм,  $h_{п} = 160$  мм) – в виде  $q_{1.3} = c_{i.2} + h_{п} = 410$  мм,  $q_{2.3} = c_{i.2} + h_{п} = 410$  мм,  $q_{3.3} = c_{i.2} + h_{п} + k_1 \Delta g_{1.3} = 502,498$  мм,  $q_{4.3} = c_{i.2} + h_{п} + k_1 \Delta g_{1.3} = 502,498$  мм.

Если из-за проседания грунта или «сползания» опор горизонтирование окажется неточным, потребуются дополнительное подгоризонтирование платформы, которое реализуется на этапе 4 работы.

**Этап 4.** Если сигнал «Запрет 3» не сформирован, а точность горизонтирования ниже заданного значения, осуществляется выдвигание штоков из гидроцилиндров опор 1–4 (см. рис.1) и точное подгоризонтирование. Данный этап может повторяться несколько раз [3] до получения требуемой точности горизонтирования. БУ постоянно анализирует данные, поступающие с датчиков 6–8, и определяет состояние каждой из четырех опор. При возникновении аварийной ситуации БУ формирует сигнал «Запрет 4» и работа системы и специального оборудования прекращается.

Для подгоризонтирования опорной платформы (см. рис. 2) используются данные ( $\varphi_{пр.3}$ ,  $\varphi_{п.3}$ ,  $c_{i.3}$ ), измеренные в конце этапа 3. Затем рассчитываются и запоминаются отклонения продольного и поперечного углов наклона платформы  $\Delta\varphi_{пр.4} = \varphi_{пр.3} - \varphi_{пр.тр}$ ,  $\Delta\varphi_{п.4} = \varphi_{п.3} - \varphi_{п.тр}$  и приращения ординат  $\Delta g_{1.4} = |A \sin \Delta\varphi_{пр.4}|$ ,  $\Delta g_{2.4} = |B \sin \Delta\varphi_{п.4}|$ . С помощью таблицы формируются новые задания  $q_{i.4} = c_{i.3} + k_1 \Delta g_{1.4} + k_2 \Delta g_{2.4}$  для гидроцилиндров опор 1–4.

При наклоне платформы ( $\Delta\varphi_{пр.4} = 0,1^\circ$ ,  $\Delta\varphi_{п.4} = 0^\circ$ ,  $A = 5300$  мм,  $B = 4870$  мм,  $\Delta g_{1.4} = |A \sin 0,1^\circ| = 9,250$  мм,  $\Delta g_{2.4} = |B \sin 0^\circ| = 0$  мм,  $c_{i.3} = h_3 + h_T + h_n = 410$  мм) получим задания в виде  $q_{1.4} = c_{1.3} = 410$  мм,  $q_{2.4} = c_{2.3} = 410$  мм,  $q_{3.4} = c_{3.3} + k_1 \Delta g_{1.3} = 419,250$  мм,  $q_{4.4} = c_{4.3} + k_1 \Delta g_{1.3} = 419,250$  мм.

Следует заметить, что при мягком грунте возможно проседание и(или) «сползание» опор и этап 4 нужно повторять несколько раз, пока горизонтирование платформы не достигнет требуемой точности или будет наблюдаться постоянство отклонений продольного  $\Delta\varphi_{пр.4+j} = \varphi_{пр.4+j} - \varphi_{пр.тр}$  и поперечного  $\Delta\varphi_{п.4+j} = \varphi_{п.4+j} - \varphi_{п.тр}$  углов наклона, где  $j$  – количество повторений этапа 4 ( $j = 1, 2, 3, \dots$ ). После двух- и трехкратного повторения этап 4 следует прекратить, а текущие углы  $\varphi_{пр.4+j}$ ,  $\varphi_{п.4+j}$  и отклонения  $\Delta\varphi_{пр.4+j}$ ,  $\Delta\varphi_{п.4+j}$  запомнить. Для исключения частого включения этапа 4 в процессе работы специального оборудования нужно установить пределы изменения углов  $\Delta\varphi_{пр.4+j}$ ,  $\Delta\varphi_{п.4+j}$ , при которых этап 4 не будет включаться. В качестве пределов нечувствительности целесообразно выбрать значения  $\Delta\varphi_{пр.0} = (2-3)\Delta\varphi_{пр.4+j}$ ,  $\Delta\varphi_{п.0} = (2-3)\Delta\varphi_{п.4+j}$ .

Наличие сигналов «Запрет 1–3» указывает оператору на необходимость передислокации на другую позицию и повторного включения в работу СПГ. Выключение СПГ (см. рис. 1) осуществляется путем перевода тумблера на пульте управления 11 в положение выключения, после чего БУ поэтапно в обратном порядке производит нужные манипуляции с гидроцилиндрами опор 1–4 и снимает питание со всех элементов системы.

#### 4. Рекомендации по реализации способа и определению параметров пространственной модели опорной платформы

Для реализации способа автоматического подъема и горизонтирования опорной платформы необходимо решить следующие задачи:

1. Определить динамические свойства опорных агрегатов как объектов управления (ОУ) и организовать управление ими по усилию и положению. Для идентификации ОУ можно использовать ранее разработанный метод [6], а для обеспечения требуемых характеристик переходного процесса – различные цифровые регуляторы [7–12].

2. Организовать поэтапную работу СПГ в автоматическом режиме и определить параметры пространственной модели опорной платформы.

Параметры пространственной модели опорной платформы можно определить следующим образом:

– выполнить точное горизонтирование платформы и запомнить усилия  $p_1 - p_4$ , действующие на гидроцилиндры опор 1–4;

– рассчитать удаления гидроцилиндров опор от поперечной  $L$  и продольной  $Q$  осей

платформы (см. рис. 2):  $a = \frac{(p_3 + p_4)A}{p_1 + p_2 + p_3 + p_4}$ ,  $b = \frac{(p_2 + p_3)B}{p_1 + p_2 + p_3 + p_4}$ ,  $a_1 = A - a$ ,  $b_1 = B - b$ . Напри-

мер, для значений  $A = 5300$  мм,  $B = 4870$  мм,  $p_1 = 44,6$  бар,  $p_2 = 46,1$  бар,  $p_3 = 30,5$  бар,  $p_4 = 30,6$  бар получены параметры  $a = 2133,268$  мм,  $b = 2457,457$  мм,  $a_1 = 3166,732$  мм,  $b_1 = 2412,543$  мм. Здесь усилия  $p_1 - p_4$  определены с помощью датчиков давлений (установленных в поршневых полостях гидроцилиндров опор). Следует заметить, что значения давлений в полостях гидроцилиндров сильно зависят от температуры рабочей жидкости. При точном горизонтировании опорной платформы параметры пространственной модели ( $a$ ,  $a_1$ ,  $b$ ,  $b_1$ ) и их проекции на горизонтальную плоскость совпадают.

Используя полученные данные, можно определить высоту ЦМ относительно опорной поверхности. Для этого необходимо наклонить платформу (рис. 3) относительно горизонта на некоторый угол  $\delta\varphi_{\text{пр}}$  или  $\delta\varphi_{\text{п}}$  и по новым значениям усилий  $p_1^* - p_4^*$  рассчитать параметры  $a^*$  или  $b^*$ , которые в этом случае являются проекциями на горизонтальную плоскость. При наклоне платформы базовые расстояния  $A, B$  не изменяются, а проекции ( $a^*, a_1^*, b^*, b_1^*$ ) на горизонтальную плоскость в общем случае изменяются. В результате происходит сближение опор на величину  $\Delta a = a(1 - \cos\varphi_{\text{пр}})$  или  $\Delta b = b(1 - \cos\varphi_{\text{п}})$ , которое на предельных углах наклона платформы  $|\varphi_{\text{пр}}| = 6,392^\circ$ ,  $|\varphi_{\text{п}}| = 6,959^\circ$  составит  $\Delta A = A(1 - \cos\varphi_{\text{пр}}) = 32,948$  мм,  $\Delta B = B(1 - \cos\varphi_{\text{п}}) = 35,877$  мм. Кроме того, при наклоне платформы (когда ЦМ находится выше или ниже опорной плоскости) происходит смещение на величину  $\delta a = a^* - a \cos\varphi_{\text{пр}}$ ,  $\delta b = b^* - b \cos\varphi_{\text{п}}$  координат ЦМ и осей  $L, Q$ .

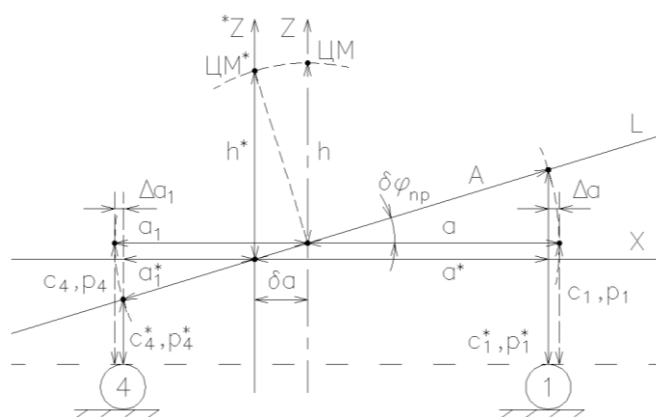


Рис. 3. Определение высоты ЦМ над(под) опорной поверхностью платформы:

1, 4 – опоры;  $c_i, p_i$  – ординаты, усилия опор;  $h$  – высота ЦМ над опорной поверхностью;

$\delta\varphi_{\text{пр}}$  – продольный угол наклона;  $X, Z$  – горизонтальная, вертикальная оси;  $L$  – продольная ось платформы;

$a, a^*, a_1, a_1^*$  – расстояния до и после наклона платформы;  $h, h^*$  – высота ЦМ до и после наклона платформы;

$\delta a, \Delta a$  – смещение координат опор после наклона платформы

Для расчета высоты ЦМ относительно опорной поверхности необходимо использовать выражения  $h = 2\delta a / \sin 2\delta\varphi_{\text{пр}} = 2(a^* - a \cos\varphi_{\text{пр}}) / \sin 2\delta\varphi_{\text{пр}}$ ,  $h = 2\delta b / \sin 2\delta\varphi_{\text{п}} = 2(b^* - b \cos\varphi_{\text{п}}) / \sin 2\delta\varphi_{\text{п}}$ . При положительном значении углов  $\delta\varphi_{\text{пр}}$ ,  $\delta\varphi_{\text{п}}$  и положительном знаке смещения координат  $\delta a, \delta b$  ЦМ находится над опорной поверхностью, а при отрицательном знаке смещения координат – под опорной поверхностью. При отрицательном значении углов  $\delta\varphi_{\text{пр}}$ ,  $\delta\varphi_{\text{п}}$  и отрицательном знаке смещения координат  $\delta a, \delta b$  ЦМ находится над опорной поверхностью, а при положительном знаке смещения координат – под опорной поверхностью. Так, например, для наклоненной платформы ( $A = 5300$  мм,  $B = 4870$  мм,  $a = 2133,268$  мм,  $b = 2457,457$  мм,  $\delta\varphi_{\text{пр}} = 1,54^\circ$ ) получены параметры  $p_1 = 42,4$  бар,  $p_2 = 45,9$  бар,  $p_3 = 29,8$  бар,  $p_4 = 32,1$  бар и определены  $a^* = 2184,221$  мм,  $b^* = 2454,454$  мм,  $\Delta a = 0,771$  мм,  $\delta a = 51,724$  мм,  $h = 1925,303$  мм.

Для качественного управления гидроцилиндрами опор 1–4 нужно знать функциональные зависимости параметров  $a^*, b^*$  от углов наклона  $\delta\varphi_{\text{пр}}$ ,  $\delta\varphi_{\text{п}}$ . Поэтому измерение параметров пространственной модели опорной платформы следует проводить несколько раз (5–10) при различных наклонах платформы в пределах рабочих углов  $\pm\varphi_{\text{пр},1}$ ,  $\pm\varphi_{\text{п},1}$ . Получив функциональную зависимость  $a^* = f(\delta\varphi_{\text{пр}})$ ,  $b^* = f(\delta\varphi_{\text{п}})$ , необходимо рассчитать коэффициенты  $d_1 = a/a_1^*$ ,  $d_2 = b/b_1^*$  и использовать их для модуляции сигналов управления гидроцилиндрами опор 1–4.

В процессе отработки заданий гидроцилиндрами опор при подъеме, горизонтировании и свертывании из-за перекрестных связей между усилиями на опоры могут произойти опасные перекосы платформы, для исключения которых обычно осуществляют синхронизацию движения опор путем задания скорости перемещения подвижной части опоры [1]. Значительно проще эта проблема решается путем применения авторского метода придания системе управления гидроцилиндрами опор 1–4 требуемых фильтрующих свойств [13]. Применение метода позволяет автоматически синхронизировать работу опор 1–4 за счет использования цифровых корректирующих устройств и ограничителей скорости, стабилизирующих работу гидроприводов при отработке ступенчатых сигналов большой амплитуды.

При проектировании гидроприводов важным моментом является согласование соотношения коэффициентов проводимости рабочих окон гидрораспределителей с соотношением эффективных площадей напорных и сливных полостей гидроцилиндров [14].

### Заключение

Разработанный способ автоматического подъема и горизонтирования опорной платформы в отличие от существующих аналогов предполагает выполнение за один цикл работы следующих операций: оценки состояния грунта, поднятия платформы, разгрузки элементов ходовой части и горизонтирования опорной платформы. Это позволяет использовать данный способ не только в различных статических, но и динамических системах горизонтирования типа активной подвески, где для исключения продольной и поперечной качки опорной платформы при ее движении одновременно участвуют в работе все опорные агрегаты. Для реализации способа требуются двухкоординатный (крена и тангажа) датчик наклона, сориентированный по продольной и поперечной осям платформы; четыре датчика усилия (или давления рабочей жидкости в поршневой полости при использовании гидравлических опор) и четыре датчика положения опор.

Способ основывается на применении двух контуров управления по усилию и положению, что позволяет оценить состояние грунта и повысить точность работы системы. Данный способ может быть реализован и при наличии более четырех управляемых опорных агрегатов. В работе определены параметры качественной оценки состояния опорной платформы на всех этапах функционирования системы и необходимые корректирующие и запретные сигналы. Применение нового способа исключает отрыв опор от грунта, выдвижение опор на максимальную длину, а также касание колес машины опорной поверхности.

Для исключения опасных перекосов платформы при ее подъеме и опускании применена автоматическая синхронизация движения опор. Даны рекомендации по реализации способа и экспериментальному определению параметров пространственной модели опорной платформы. С целью формирования рекомендаций практического характера в дальнейшем планируется провести исследование гидравлической системы горизонтирования радиолокационной станции, реализующей предложенный способ.

### Список литературы

1. Способ ориентации установки несущей грузовой платформы и устройство для его осуществления : пат. 2367762 С1 Российская Федерация, МПК E21B7/02, B66F7/20 / В.В. Артемов, Н.С. Говоров, С.Н. Говоров, Ю.В. Молокин, В.Ф. Хрипченко, Д.А. Чурзин ; заявитель Говоров Н.С. – № 2367762 ; заявл. 17.01.2008 ; опубл. 20.09.2009.

2. Способ автоматического горизонтирования несущей платформы с буровым агрегатом и устройство для его реализации : пат. 2196893 С1 Российская Федерация, МПК E21B44/00, E21B7/02 / И.А. Сидоров, В.Н. Чухлебов ; заявители Сидоров И.А., Чухлебов В.Н. – № 2196893 ; заявл. 24.04.2001 ; опубл. 20.01.2003.

3. Щербаков, В.С. Метод автоматического подъема, выравнивания опорной платформы строительной машины в горизонтальной плоскости и контроля отрыва выносных опор от грунта / В.С. Щербаков, М.С. Корытов, М.Г. Григорьев // Известия высш. учебн. завед. Приволжский регион. Технические науки. – 2010. – № 1(13). – С. 146–154.

4. Активная подвеска : пат. DE 34 08 292 A1 Германия, МКИ В 60 G 17/00 / Schussler Robert, Acker Bernd заявитель Daimler-Benz AG. – № Р 34 08 292 1 ; заявл. 07.03.84 ; опубл. 29.08.85.
5. Подвеска подвижного транспорта : пат. DE 41 23 706 A1 Германия, МКИ В 60 G 17/00, F 15 B 1/00 / Hees Eberhard, Wagner Micha, Zhang Rongqiar, Florchinger Jurg ; заявитель Fichtel & Sachs AG. – № Р 41 23 706 4 ; заявл. 17.07.91 ; опубл. 21.01.93.
6. Стрижнев, А.Г. Метод исследования нелинейных объектов управления, работающих в заданном диапазоне выходных координат / А.Г. Стрижнев, А.А. Шихов, А.Н. Русакович // Информатика. – 2015. – № 3(47). – С. 81–89.
7. Гостев, В.И. Проектирование нечетких регуляторов для систем автоматического управления / В.И. Гостев. – СПб. : БХВ-Петербург, 2011. – 416 с.
8. Стрижнев, А.Г. Синтез цифрового регулятора, включенного параллельно единичной обратной связи / А.Г. Стрижнев, М.К. Хаджинов, А.Н. Русакович // Доклады БГУИР. – 2014. – № 4(82). – С. 80–86.
9. Стрижнев, А.Г. Автоматизированный синтез цифровых регуляторов на основе дискретных передаточных функций объектов управления / А.Г. Стрижнев, А.Н. Русакович // Информатика. – 2013. – № 3(39). – С. 105–114.
10. Стрижнев, А.Г. Синтез оптимального цифрового регулятора для систем с объектом управления четвертого порядка / А.Г. Стрижнев, Г.В. Ледник // Информатика. – 2013. – № 4(40). – С. 66–73.
11. Стрижнев, А.Г. Синтез цифрового регулятора для объекта управления пятого порядка с применением оптимальных управляющих воздействий / А.Г. Стрижнев, Г.В. Ледник, А.Н. Русакович // Информатика. – 2014. – № 1(41). – С. 59–67.
12. Стрижнев, А.Г. Система автоматического управления переменной структуры с цифровыми регуляторами / А.Г. Стрижнев, А.Н. Русакович // Наука и техника. – 2015. – № 4. – С. 37–44.
13. Стрижнев, А.Г. Метод придания одноконтурной замкнутой системе автоматического управления требуемых фильтрующих свойств / А.Г. Стрижнев // Информатика. – 2016. – № 4(12). – С. 31–37.
14. Гойдо, М.Е. Проектирование объемных гидроприводов / М.Е. Гойдо. – М. : Машиностроение, 2009. – 304 с.

Поступила 30.05.2017

*НПООО «ОКБ Техносоюзпроект»,  
Минск, пр. Независимости, 115  
e-mail: strizhnev.ag@gmail.com*

**A.G. Stryzhniou**

### **METHOD FOR AUTOMATIC RAISING AND LEVELING OF SUPPORT PLATFORM**

The paper presents the method for automatic raising and leveling of support platform that differ from others in simplicity and versatility. The method includes four phases of raising and leveling when performance capabilities of the system is defined and the soil condition is tested. In addition, the current condition of the system is controlled and corrected with the issuance of control parameters to the control panel. The method can be used not only for static, but also for dynamic leveling systems, such as active suspension. The method assumes identification and dynamics testing of reference units. The synchronization of reference units moving was implemented to avoid dangerous skewing of support platform. The recommendations for the system implementation and experimental model identification of support platform are presented.

УДК 629.3.027.3

В.С. Кончак<sup>1</sup>, С.В. Хитриков<sup>1</sup>, Д.А. Швец<sup>1</sup>, Я.А. Богданов<sup>1</sup>,  
Ю.И. Николаев<sup>2</sup>, В.Л. Ефремов<sup>2</sup>

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕМПФИРУЮЩИХ СВОЙСТВ МОДЕЛИ АДАПТИВНОГО АМОРТИЗАТОРА

*Исследуется проектируемый образец адаптивного амортизатора, предназначенного для использования в системах поддрессоривания грузовых автомобилей, работающих в условиях бездорожья. Приводится схема испытаний и используемое для их проведения оборудование. Дается описание методов контроля точностных характеристик измерительного и управляющего оборудования, а также методов моделирования управляющих процессов для получения характеристик исследуемого образца. Предлагаются программа и методика испытаний.*

### Введение

Проектирование транспортных средств, работающих в сложных дорожных условиях, связано с необходимостью разработки систем поддрессоривания, способных гасить вертикальные колебания движущегося автомобиля и тем самым улучшать комфортность работы водителя, безопасность перевозки пассажиров и транспортировки грузов. Для этой цели используются управляемые подвески, которые на основании измеренной информации о величине перемещения катящегося по профилю дороги колеса изменяют в реальном масштабе времени сопротивление взаимному перемещению поддрессоренной и неподдрессоренной масс, регулируют уровень их колебаний. Такие подвески получили название адаптивных. Реализация регулирования силы сопротивления в них может быть выполнена либо с помощью электромагнитных клапанов, либо за счет использования в качестве наполнителя цилиндра амортизатора жидкости [1], вязкость которой изменяется в зависимости от величины приложенного магнитного поля. Управление магнитным полем в обоих случаях осуществляется с помощью электронного блока управления (ЭБУ).

Наиболее распространенными в мировой практике адаптивными подвесками являются Adaptive Damping System, ADS (Mercedes-Benz) [2], Adaptive Variable Suspension, AVS (Toyota) [3], Adaptive Chassis Control, DCC (Volkswagen) [4], Continuous Damping Control CDS (Opel) [5], Electronic Damper Control EDC (BMW) [6]. В перечисленных подвесках для управления демпфированием используют электромагнитные дроссели и оборудуют такими подвесками автомобили представительского класса для создания комфортности передвижения по дорогам с хорошим и удовлетворительным покрытием.

Магнитореологическая жидкость как средство противодействия перемещению поршня амортизатора используется в конструкции подвесок автомобилей Cadillac, Chevrolet (система MagneRide от General Motors) и Magnetic Ride от Audi. Грузовые автомобили грузоподъемностью от двух до шести тонн, в которых используются адаптивные амортизаторы с магнитореологической жидкостью, производит только фирма Stewart & Stevenson. Производителем и поставщиком для них магнитореологической жидкости служит фирма «LORD Corporation» [7].

Целью настоящей работы является разработка методов и средств экспериментальных исследований как самого амортизатора, так и системы управления его исполнительного органа – управляемого дросселя, создающего сопротивление перемещению штока амортизатора с целью гашения колебаний поддрессоренной массы.

### 1. Назначение исследований

При разработке новых образцов систем поддрессоривания возникает необходимость проведения их экспериментальных исследований в различных режимах нагружения. Применение же новых принципов функционирования, закладываемых в конструкцию изделия, требует про-

верки на соответствие техническому заданию в различных условиях эксплуатации. Наиболее информативным средством для изучения реальных свойств разрабатываемого изделия являются натурные испытания (стендовые и дорожные). Основное назначение испытаний – это получение экспериментальных данных, позволяющих вычислить такие параметры системы поддресоривания, как собственная частота колебаний, коэффициент затухания, жесткость, импульсная переходная и передаточная характеристики и другие показатели, отображающие ее физические свойства. Кроме того, необходимо получить функциональную зависимость силы сопротивления колебаний поддресоренной массы от перемещения и скорости движения штока амортизатора, что позволит построить базу знаний, в рамках которой и будут работать алгоритм и система управления адаптивным амортизатором.

## 2. Схема испытаний и используемое оборудование

Испытательный стенд фактически является физической моделью условий, в которых реально работает исследуемое изделие. Поэтому он должен содержать систему нагружения, имитирующую воздействие на амортизатор неровностей дороги, и систему управления режимом демпфирования. В качестве системы нагружения используется оборудование стенда фирмы SCHENK с сервогидравлическим управлением. В этом оборудовании исполнительным устройством является гидравлический цилиндр, управляемый усилительной стойкой, которая обеспечивает автоматический контроль и стабилизацию управляющих сигналов. Схема испытательного стенда изображена на рис. 1. Адаптивный амортизатор 5 закреплен одним концом на поршне гидравлического цилиндра 10, а другим – на неподвижной балочке, ограничивающей перемещение. Температура  $T(i\Delta t)$  циркулирующей в системе амортизатора жидкости измеряется датчиками 3, установленными на управляющем дросселе 1. Результаты ее измерения накапливаются в компьютере системы управления силовым стендом.

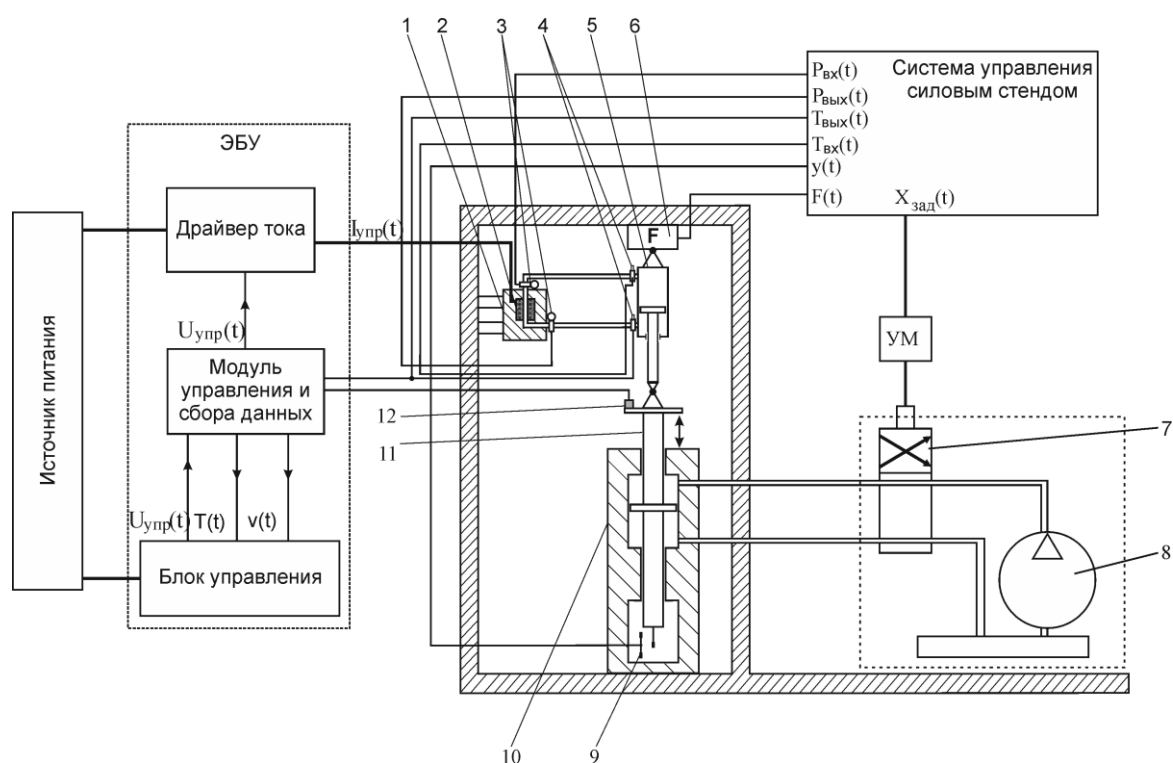


Рис. 1. Схема испытательной установки для исследования демпфирующих свойств адаптивного амортизатора (1 – управляющий дроссель; 2 – катушка; 3 – датчики температуры; 4 – датчики давления; 5 – адаптивный амортизатор; 6 – датчик силы; 7 – сервогидравлический клапан; 8 – гидронасос; 9 – датчик перемещения; 10 – гидроцилиндр; 11 – поршень гидроцилиндра; 12 – датчик скорости; УМ – усилитель мощности)

Сигнал  $X_{\text{зад}}(t)$ , сформированный системой управления силовым стендом, подается на усилитель мощности и с помощью сервогидравлического клапана 7 управляет работой гидронасоса 8, который и обеспечивает перемещение с нужной скоростью поршня 11 гидроцилиндра 10. Величина перемещения измеряется датчиком 9, а его скорость – датчиком 12. Реакция на перемещение поршня измеряется датчиком силы 6. Регулирование силы сопротивления адаптивного амортизатора осуществляется ЭБУ, который состоит из модуля сбора данных, драйвера тока и блока управления (см. рис. 1).

В исследовательском режиме блок управления должен обеспечить изучение поведения адаптивного амортизатора при постоянном управляющем токе и переменной амплитуде функции перемещения штока амортизатора. При этом на катушку 2 дросселя подается постоянный ток  $I_{\text{упр}}(t)$ , который формируется в драйвере тока путем подачи на его вход напряжения  $U_{\text{упр}}(t)$  с цифроаналогового преобразователя (ЦАП) модуля сбора данных. Цифровое значение управляющего сигнала  $U(t)$  в соответствии с алгоритмом вырабатывается модулем управления в зависимости от величины скорости перемещения  $V(t)$  подпрессоренной массы и температуры  $T(t)$  жидкости в амортизаторе. Функция скорости перемещения  $\dot{y}(t)$ , измеренная датчиком 12, преобразуется с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и сохраняется в памяти блока управления.

Результаты измерения: реализации функции давления  $P(t)$ , температуры жидкости  $T(t)$ , функции перемещения штока амортизатора  $y(t)$  и реакции на нее  $F(t)$  – сохраняются в памяти компьютера системы управления силовым стендом и передаются для дальнейшей обработки.

На рис. 2 показан снимок стенда, изготовленного в соответствии со схемой на рис. 1 и предназначенного для испытания адаптивного амортизатора.

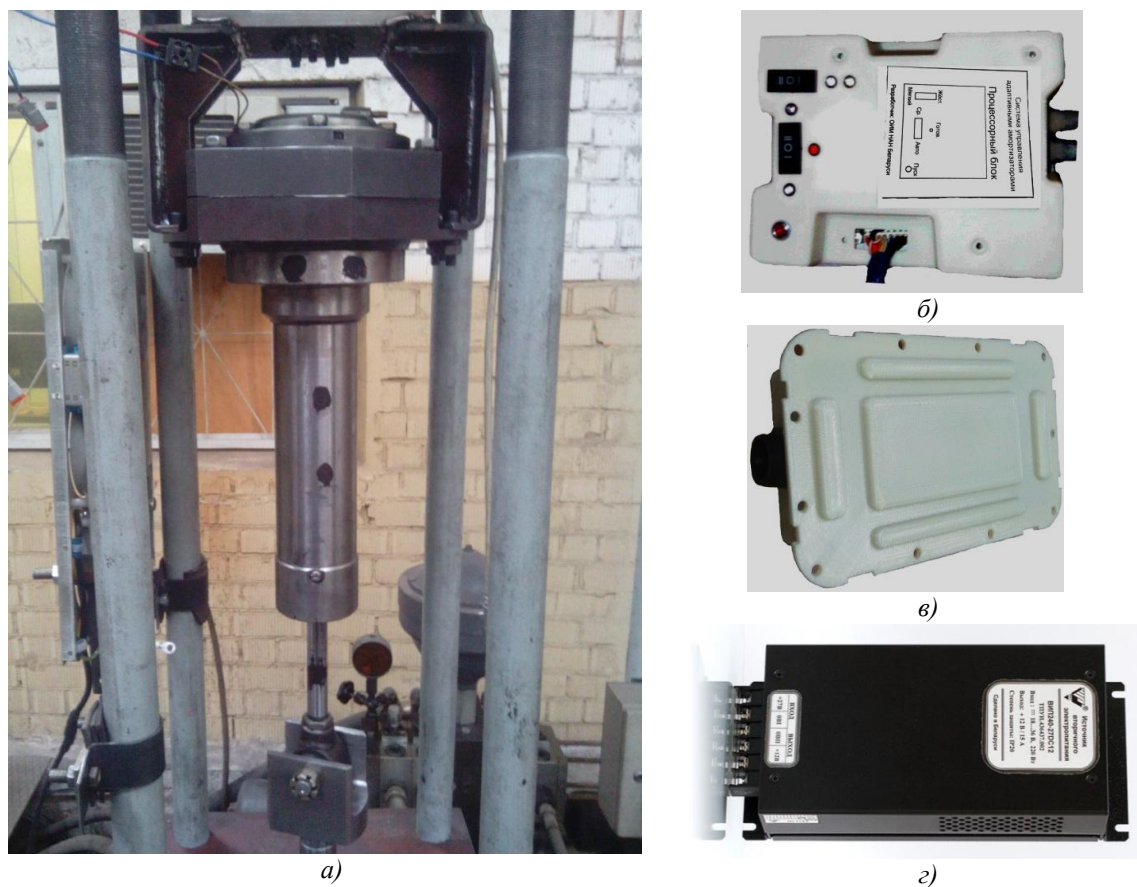


Рис. 2. Снимок стенда для исследования демпфирующих свойств адаптивного амортизатора: а) силовой стенд для испытания амортизатора; б) блок управления; в) модуль сбора данных; г) драйвер тока



Схема испытаний и макет ЭБУ в составе модуля сбора данных, драйвера тока и блока управления разработаны и изготовлены специалистами Объединенного института машиностроения НАН Беларуси, а конструкторская документация на оснастку стенда и макет адаптивного амортизатора – специалистами ОАО «Минский завод колесных тягачей».

### 3. Программа испытаний макетного образца адаптивного амортизатора

В соответствии со схемой испытательной установки (см. рис. 1) у исследуемого объекта отсутствует поддрессоренная масса. Поэтому условие динамического равновесия запишем в виде уравнения

$$r\dot{y}(t) + cy = f \sin \omega t, \quad (1)$$

решением которого будет функция перемещения

$$y = A \sin(\omega t + \alpha),$$

где  $r$  – коэффициент сопротивления перемещению;  $c$  – жесткость механической конструкции;  $f$  – амплитуда вынуждающей силы;  $A$  – амплитуда вынужденных колебаний.

Следует заметить, что уравнение (1) пригодно только для тех объектов, у которых колебания, возникшие под воздействием гармонической вынуждающей силы, будут также гармоническими. В противном случае система будет нелинейной. Если такую систему при исследовании возбуждать негармонической функцией, то будет нарушено свойство суперпозиции. Методы построения в системах функциональной зависимости выходного сигнала от входа изложены в работе [9].

Таким образом, в процессе эксперимента в качестве функции перемещения используются гармонические сигналы. При этом испытания выполняются в последовательности, изложенной ниже.

#### 3.1. Подготовка стенда к работе

Все описанные в данном разделе операции выполняются на стенде до монтажа на нем испытуемого изделия. Целью их проведения является исследование точностных характеристик измерительного оборудования и динамических свойств самого стенда. В соответствии с методикой проведения стендовых испытаний, изложенной в [8], подготовке стенда к работе должно предшествовать выполнение поверочных работ измерительного и управляющего оборудования, системы связи с объектом и тарировка датчиков.

Процесс колебаний гидравлического цилиндра осуществляется под управлением сервогидравлического клапана, от точности срабатывания которого зависит точность воспроизведения частоты колебаний поршня гидроцилиндра. Для контроля частотного диапазона необходимо протестировать систему управления стенда на временном интервале в одну секунду гармониками в 1, 2, 3, 5, 7 Гц. Контроль точности воспроизведения частоты колебаний осуществляется с использованием штатного датчика перемещения. По результатам анализа полученной информации делается вывод о точности воспроизведения частоты колебаний гидроцилиндра. При этом гармоника первой частоты на временном интервале в одну секунду уложится точно один раз, второй – два раза, третьей – три раза и т. д.

Гидравлический стенд, являясь динамической системой, имеет свою передаточную характеристику, которую следует учитывать в процессе проведения исследовательских испытаний. Увеличение частоты колебаний приводит к возрастанию скорости перемещения поршня, а следовательно, в результате возрастания силы сопротивления – к изменению амплитуды колебаний. Исходными данными для такого анализа являются результаты испытания стендового оборудования, проведенного в соответствии со следующей программой.

#### 3.2. Программа проведения исследования частотного диапазона гидроцилиндра стенда

Для проверки правильности отработки частоты колебаний поршня гидроцилиндра необходимо осуществить следующие действия:

– выполнить моделирование процессов тестовых сигналов

$$y_k(i\Delta t) = A_0 \sin 2\pi k\Delta f i\Delta t$$

для  $i = 0, 1, 2, \dots, 1023$ ,  $k = 1, 4, 8, 12, 20, 28$ ,  $\Delta f = 0,25$  Гц,  $\Delta t = 0,000977$  с и для  $\Delta f = 0,24414$  Гц;  $\Delta t = 0,001$  с;

– выдать последовательно на стенд полученные реализации, измерить функцию перемещения поршня, результат измерения сохранить;

– по результатам измерения функции перемещения поршня гидроцилиндра выполнить спектральный анализ полученной реализации. Сравнить величину частоты, вычисленной в результате анализа, с заданной. По точности совпадения частот колебаний (заданной и полученной экспериментально) судят о правильности работы сервогидравлического клапана.

Для проверки степени зависимости амплитуды колебаний поршня гидроцилиндра от частоты необходимо выполнить моделирование ансамбля реализаций гармонических функций:

$$y_k(i\Delta t) = A_k \sin 2\pi k\Delta f i\Delta t$$

для  $i = 0, 1, 2, \dots, 4095$ ;  $k = 1, 2, 3, \dots, 40$ ;  $\Delta f = 0,25$  Гц;  $\Delta t = 0,000977$  с.

Изменения амплитуды  $A_k$  функции перемещения поршня гидроцилиндра осуществляются в соответствии с ГОСТ 53816–2010 [10], а также с рекомендацией завода-изготовителя стендового оборудования. В качестве начального приближения в процессе испытания для каждой частоты используется величина амплитуды, указанная в рекомендации, а по результатам испытания вносится корректировка и строится таблица, которая применяется затем при моделировании ансамбля реализаций для испытания адаптивного амортизатора на силовом стенде.

Приведенная в данной работе таблица была скорректирована в соответствии с технической характеристикой используемого гидроцилиндра, у которого амплитуда скорости перемещения штока не должна превышать 0,6 м/с. Использование данного условия позволило на всем частотном диапазоне получить максимально возможную амплитуду функции перемещения (от 80 мм на низкой частоте до 8 мм на частоте 10 Гц) и, как видно из таблицы, постоянную скорость перемещения, благодаря чему гарантируется высокое качество управления демпфированием.

Исходные данные для формирования гармонических функций системой управления

Номер гармоники	Частота, Гц	Амплитуда перемещения, мм	Амплитуда скорости, м/с	Номер гармоники	Частота, Гц	Амплитуда перемещения, мм	Амплитуда скорости, м/с
1	0,25	80	0,125664	21	5,25	16	0,527789
2	0,50	80	0,251328	22	5,50	15	0,518364
3	0,75	80	0,376992	23	5,75	15	0,541926
4	1,00	80	0,502656	24	6,00	14	0,527789
5	1,25	68	0,534072	25	6,25	14	0,549780
6	1,50	57	0,537214	26	6,50	13	0,530930
7	1,75	48	0,527789	27	6,75	13	0,551351
8	2,00	42	0,527789	28	7,00	12	0,527789
9	2,25	38	0,537214	29	7,25	12	0,546638
10	2,50	34	0,534072	30	7,50	11	0,518364
11	2,75	31	0,535643	31	7,75	11	0,535643
12	3,00	28	0,527789	32	8,00	10	0,502656
13	3,25	26	0,530930	33	8,25	10	0,518364
14	3,50	24	0,527789	34	8,50	10	0,534072
15	3,75	23	0,541926	35	8,75	9	0,494802
16	4,00	21	0,527789	36	9,00	9	0,508939
17	4,25	20	0,534072	37	9,25	9	0,523076
18	4,50	19	0,537214	38	9,50	9	0,537214
19	4,75	18	0,537214	39	9,75	8	0,490090
20	5,00	17	0,534072	40	10,00	8	0,502656

### 3.3. Моделирование ансамбля реализаций функции перемещения поршня гидроцилиндра в режиме стендовых испытаний

Исследование адаптивного амортизатора на стенде осуществляется в режиме вынужденных колебаний, источником которых является модель неровности поверхности дороги, по которой движется автомобиль. Амортизатор – это средство гашения колебаний подрессоренной массы автомобиля. Однако учитывая, что реальная система подрессоривания нелинейная, для стендовых испытаний в качестве функций нагружения используются гармонические функции [9] в диапазоне частот 0,25–10,0 Гц с дискретностью по частоте  $\Delta f = 0,25$  Гц.

Величина амплитуды для каждой из частот приведена в таблице, которая построена в соответствии с программой, изложенной в подразд. 3.2. Дискретность отсчетов по времени  $\Delta t = 0,000977$  с, а период реализации  $T = 4,0$  с. Число отсчетов реализации  $N = 4096$ . Учитывая, что процесс измерений проводится на установившемся режиме, реализация будет содержать четыре периода, чтобы избежать появления переходных процессов. Для формирования первого периода (разгона стенда) ординаты вводимой гармонической функции  $x(i\Delta t)$  умножаются на весовую функцию  $i/N$ , т. е.  $X(i\Delta t) = x(i\Delta t) \cdot i/N$ , где  $i = 1, 2, 3, \dots, N$ . Второй и третий периоды реализации – это ординаты гармонической функции  $x(i\Delta t)$  без изменения (второй период – выход на режим установившихся колебаний, третий – рабочий режим). Ординаты четвертого периода (режим затухания колебаний) вычисляются как  $X(i\Delta t) = x(i\Delta t) \cdot 1/i$ . Измерение ординат функции сопротивления  $F(i\Delta t)$  выполняется синхронно с выдачей ординат функции перемещения на протяжении третьего периода.

Построенные таким образом процессы формируются в ансамбль, содержащий 40 реализаций, которые используются в качестве функций нагружения исследуемого объекта, хранятся в отдельном файле системы управления испытательным стендом и применяются во всех режимах испытания адаптивного амортизатора.

## 4. Использование макета электронного блока управления в режиме динамических испытаний

Амортизатор устанавливается на стенде, как показано на рис. 1. Испытания проводятся в двух режимах: при отсутствии управляющего тока в катушке электромагнита и в режиме управления с использованием электронного блока управления. Процесс управления силовым цилиндром для обоих режимов идентичен и будет выполняться в соответствии со следующими правилами. В качестве управляющего сигнала используется ансамбль реализаций, сформированный в соответствии с методикой моделирования функции нагружения, изложенной в подразд. 3.3 настоящей работы. Процесс выдачи функции нагружения на исполнительный цилиндр и измерение функции сопротивления перемещению производятся в соответствии с правилами формирования реализаций, изложенными в том же разделе.

### 4.1. Исследование адаптивного амортизатора при отключенной системе управления

В рассматриваемом режиме адаптивный амортизатор работает аналогично обычному гасителю колебаний. Следовательно, его испытания на стенде при отсутствии управляющего тока будут происходить следующим образом. Из ансамбля вызывается реализация функции перемещения, которую система управления стендом с помощью ЦАП подает для управления цилиндром. Процесс управления при этом происходит так, как описано в подразд. 3.3.

Все результаты измерения, записанные с датчиков, сохраняются для дальнейшей обработки. Параллельно идет контроль показаний датчика температуры. Если в какой-то момент времени температура жидкости превысила  $150^\circ$ , испытания останавливаются и осуществляется охлаждение амортизатора.

Когда номер гармонической функции изменяется, описанный выше процесс повторяется. Количество таких циклов испытаний – 40.

#### ***4.2. Исследование адаптивного амортизатора при постоянном управляющем сигнале***

Для исследования зависимости характеристик адаптивного амортизатора от величины управляющего тока катушка электромагнита подключается к электронному блоку управления. В результате этого в дросселе возникает магнитное поле, воздействие которого изменит пропускную способность его канала. Так как величина тока в процессе одной итерации испытаний остается постоянной, данный режим будет идентичным описанному в подразд. 4.1. Величина тока будет последовательно изменяться от 0,5 до 10 А с приращением на каждом следующем режиме управления на  $\Delta U_{\text{упр}}$  В.

#### ***4.3. Исследование адаптивного амортизатора при переменном управляющем сигнале***

Испытания проводятся на стенде, у которого вместо неподвижной балочки установлена подпружиненная масса. К этой массе с помощью шаровой опоры подсоединен адаптивный амортизатор. Подпружиненная масса установлена в вертикальной направляющей, по которой она скользит в процессе колебаний. На рис. 3 показана фотография стенда, имитирующего процесс колебаний подпружиненной массы с использованием адаптивного амортизатора, управляемого с помощью ЭБУ. При проведении испытаний на таком стенде исследуется работа системы управления, отрабатывается алгоритм управления.



Рис. 3. Снимок стенда для испытания адаптивной подвески, нагруженной подпружиненной массой

### **Заключение**

Процесс доводки адаптивных амортизаторов до использования их в промышленных образцах автомобильной техники весьма сложный и трудоемкий. В настоящей работе приведен опыт использования авторами работы результатов стендовых испытаний амортизаторов в процессе их проектирования.

Исследование включает в себя подготовку к испытаниям стендового оборудования, моделирование ансамбля реализаций для управления работой стенда и исследование адаптивного амортизатора при различных уровнях управляющего сигнала. Полученная в процессе стендовых испытаний информация о функциях перемещения, силах сопротивления, скоростях перемещения штока амортизатора, температурах и давлениях жидкости в управляемом дросселе позволила вычислить важные динамические свойства объекта испытания, такие как собственная частота колебания, коэффициент демпфирования, фазовый спектр, рабочая диаграмма и характеристика, которые были использованы как база знаний при разработке алгоритма управления магнитным полем адаптивного амортизатора. Испытания амортизатора при пере-

менном управлении позволяют доработать алгоритм управления и подготовить элементы системы поддресоривания к установке на экспериментальный автомобиль для проведения дорожных испытаний.

Работа будет полезной для специалистов, занимающихся разработкой и исследованием управляемых систем поддресоривания, а также демпфированием вынужденных колебаний различных конструкций.

### Список литературы

1. Жданов, А.А. AdCAS – система автономного адаптивного управления активной подвеской автомобиля / А.А. Жданов, Д.Б. Липкевич // Труды Института системного программирования РАН. – 2004. – Т. 7. – С. 119–160.
2. Пневмоподвеска Mercedes Benz ML/GL. Общее описание, рекомендации по эксплуатации, слабые места пневматической подвески [Электронный ресурс] // Сообщество машин и людей. – Дата доступа : 03.09.2015. – Режим доступа : <http://www.drive2.ru/b/624689/>.
3. In Depth: Lexus RC 350 F Sport – what’s in it? Part F SPORT: Adaptive Variable Suspension [Electronic resource]. – ForceGT Australi. – Date of access : 01.09.2015. – Mode of access : <http://www.forcegt.com/news/in-depth-lexus-rc-350-f-sport-whats-in-it/>.
4. Volkswagen DCC Adaptive Chassis Control – Design and Function [Electronic resource]. – Date of access : 02.09.2015. – Mode of access : <http://www.my-gti.com/2653/volkswagen-dcc-adaptive-chassis-control-design-and-function>.
5. CDC – Continuous Damping Control // Kraftfahrzeugtechnik aus erster Hand [Electronic resource]. – Date of access : 03.09.2015. – Mode of access : [http://www.kfztech.de/kfztechnik/fahrwerk/federung/cdc\\_continuous\\_damping\\_ccontro.htm](http://www.kfztech.de/kfztechnik/fahrwerk/federung/cdc_continuous_damping_ccontro.htm).
6. Electronic Damper Control (EDC) // The international BMW website [Electronic resource]. – Date of access : 03.09.2015. – Mode of access : [http://www.bmw.com/en/insights/technology/technology\\_guide/artecles/electronic\\_damper\\_control.html?source=categories&article=electronic\\_damper\\_control](http://www.bmw.com/en/insights/technology/technology_guide/artecles/electronic_damper_control.html?source=categories&article=electronic_damper_control).
7. Land vehicles and systems with controllable suspension systems : пат. US 8,700,260 B2, B60G23/00; B62K25/00 / J.R. Mark, M.R. Lane, N.A. Mark ; заявитель LORD Corporation (Cary, NC, US); 13/262384 ; заявл. 03.30.10 // PCT Pub. No. WO2010/117762. – Oct. 14. 2010.
8. Кончак, В.С. Методика подготовки исходных данных для разработки динамических моделей автомобильных конструкций / В.С. Кончак, С.В. Хитриков, С.П. Лазакович // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2014. – № 1. – С. 60–68.
9. Кончак, В.С. Верификация компьютерных моделей механических конструкций с использованием результатов эксперимента / В.С. Кончак, А.А. Назаренко // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2016. – № 3. – С. 35–45.
10. Амортизаторы гидравлические телескопические. Технические требования и методы испытаний : ГОСТ Р 53816–2010. – Введ. 07.07.14. – М. : ФГУП «Стандартинформ», 2010. – 17 с.

Поступила 31.05.2017

<sup>1</sup>Объединенный институт  
машиностроения НАН Беларуси,  
Минск, ул. Академическая, 12  
e-mail: bats@ncrptm.bas-net.by

<sup>2</sup>ОАО «Минский завод колесных тягачей»,  
Минск, пр. Партизанский, 150  
e-mail: ugk@mzkt.by

**V.S. Konchak, S.V. Hitrikov, D.A. Shvets, Y.A. Bahdanau,  
J.I. Nikolaev, V.L. Efremov**

**THE TECHNIQUE OF RESEARCH OF THE DEMPPING PROPERTIES OF THE  
ADAPTIVE AMORTIZOR WITH THE CONTROLLING THROTTLE**

The research of the designed sample of the adaptive shock absorber, designed for the use in the systems of cushioning of trucks operating in off-road conditions is considered. The test scheme and the equipment used for their testing are given. Methods for controlling the accuracy characteristics of the measuring and control equipment, modeling control processes for obtaining the characteristics of the test sample are considered. The methods and program of testing procedure are given.

УДК 004.65:004.75:004.5:004.91

**С.Н. Сыгова, А.П. Дунец, А.Н. Коваленко,  
А.Л. Мазаник, Т.П. Сидорович, С.В. Черепица**

## **ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА eLab ДЛЯ АККРЕДИТОВАННЫХ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРИЙ**

*Описываются основные принципы организации и алгоритмы, лежащие в основе функционирования информационной системы eLab для аккредитованных испытательных лабораторий на основе свободного программного обеспечения (СПО). Система работает под управлением ОС Windows и Linux. Работа осуществляется через веб-интерфейс в многопользовательском режиме с разделением прав доступа посредством широко распространенных браузеров, установленных на рабочих компьютерах пользователей. Подробно рассматриваются состав ПО eLab, решение вопросов безопасности в системе и повышение ее функциональности, а также организационная структурная схема ПО и иерархия базовых классов. Приводятся алгоритмы безопасного подключения к базе данных и разворачивания ПО системы на сервере.*

### **Введение**

В настоящее время свободное программное обеспечение (СПО) занимает на мировом рынке информационных технологий большую нишу, предоставляя пользователю, в отличие от проприетарного (лицензионного, коммерческого) ПО, четыре основные свободы – права на неограниченную установку, свободное использование, модификацию и передачу ПО [1]. Исходные коды и полная техническая документация СПО находятся в свободном доступе, что облегчает его сертификацию. Использование СПО является одним из реальных способов повысить степень защиты информации. Этим обусловлен тренд движения рынка информационных технологий в сторону СПО как на Западе, так и на постсоветском пространстве. В Республике Беларусь с целью обеспечения безопасности информационных систем (ИС) принята серия указов и постановлений различного уровня. Например, в соответствии с Приказом министра обороны Республики Беларусь № 112 от 18 февраля 2011 г. «Об утверждении перечня форматов представления и протоколов передачи данных, используемых в информационных системах Вооруженных Сил и транспортных войск» ПО с поддержкой ОС Linux является приоритетным при использовании в Вооруженных Силах Республики Беларусь.

Белорусская разработка на основе СПО – система eLab – является лабораторной ИС с элементами электронного документооборота. Это электронная система клиент-серверной архитектуры на основе СПО: Debian GNU/Linux, веб-сервера Apache, сервера баз данных Firebird с использованием сервера приложений PHP. Система работает под управлением ОС Windows и Linux. Работа осуществляется через веб-интерфейс в многопользовательском режиме с разделением прав доступа посредством широко распространенных браузеров. Основные отличительные особенности eLab: разделение на системную и пользовательские базы данных (БД), сохранение текущих состояний пользовательского интерфейса, работа в реальном режиме времени с открытием страниц с данными менее чем за полсекунды при работе во внутренней (корпоративной) сети.

Первоначальной целью разработки eLab являлась автоматизация систем учета и контроля горюче-смазочных материалов (ГСМ) в Вооруженных Силах Республики Беларусь. С 2012 г. электронная система контроля качества и управления запасами горючих и смазочных материалов (E-lab ГСМ) стоит на боевом дежурстве в 202-м химмотологическом центре горючего для контроля качества и учета ГСМ Вооруженных Сил Республики Беларусь [2, 3]. Этот центр является аккредитованной испытательной лабораторией. Подсчитано, что за прошедшее время его сотрудниками проведено и запротоколировано с использованием системы eLab свыше 50 000 заказных испытаний.

В дальнейшем система eLab была адаптирована для аккредитованных испытательных лабораторий мясомолочной промышленности. В настоящее время после разработки прототипа ПО учета и контроля источников ионизирующего излучения eLab-Atom ведется работа над интеллектуальной информационной системой сотрудника Госатомнадзора Республики Беларусь для обеспечения контроля (надзора) в области ядерной и радиационной безопасности [4, 5]. Также на базе eLab была разработана оригинальная система управления контентом для создания учебно-научных порталов различных профилей eLab-Science, с помощью которой создан электронный портал ядерных знаний учреждений образования Республики Беларусь BelNET (Belarusian Nuclear Education and Training), <https://belnet.bsu.by/> [6, 7]. Также на основе eLab-Science создан научный портал проекта программы «Горизонт 2020» CoExAN (Collective Excitations in Advanced Nanostructures), <https://coexan.bsu.by>.

Таким образом, система eLab показала себя гибкой и легко настраиваемой под цели и нужды проекта. Она постоянно развивается и совершенствуется. Рассмотрим основные принципы и алгоритмы, лежащие в основе ее функционирования в настоящее время.

### **1. Процессный системный подход**

Во всем мире для эффективного функционирования аккредитованных испытательных лабораторий различного уровня на основе ключевых положений стандартов ISO 9001 и ISO 17025 [8, 9] необходимы ИС, поддерживающие все стадии жизненного цикла лабораторной деятельности. Разработка таких систем должна проводиться на основе процессного системного подхода [10–13], который предполагает понимание и менеджмент взаимосвязанных процессов в организации для достижения ее результативности и эффективности. При этом надо понимать, что в управлении бизнес-процессами (устойчивой, многократно повторяющейся деятельностью) происходит преобразование ресурсов на входе в результаты на выходе. Поэтому необходимы выделение бизнес-процесса, его детализация, определение участников, назначение одного из участников менеджером и делегирование ему полномочий и ответственности по управлению бизнес-процессом. ИС должна обеспечивать ведение бизнес-процесса от начала до конца.

Основными целями создания ИС для аккредитованных лабораторий являются обеспечение эффективного управления документацией и записями, оптимизация управления лабораторной деятельностью, повышение ее производительности и качества, в том числе проведение внутренних аудитов, управление несоответствующей продукцией, проведение корректирующих и предупреждающих действий и т. д.

Данные принципы лежат в основе создания системы eLab с самой ее первой модификации – E-lab ГСМ. Электронная система E-lab ГСМ решает производственные задачи:

- управления образцами, поступающими на испытания, регистрации результатов испытаний, паспортизации и контроля качества ГСМ, ведения лабораторных журналов по установленным нормам в соответствии с системой менеджмента качества предприятия;
- определения показателей качества в рамках проводимых испытаний, строго регламентируемых нормативной базой и списком параметров испытаний, что позволяет четко контролировать выполнение работы, минимизировать издержки и обеспечить эффективное использование оборудования и расходных ресурсов;
- управления складом расходных материалов, включая химические реактивы, учета и контроля средств измерений и испытательного оборудования;
- ведения документооборота в части работы с заказчиками, включая систему ведения договоров, управления счетами-нарядами и актами выполненных работ по установленным нормам;
- управления запасами ГСМ длительного хранения, включая управление складами и резервуарами хранения ГСМ, контроля и прогнозирования состояния ГСМ, формирования сводных планов состояния ГСМ для всех структурных единиц.

Система E-Lab ГСМ включает модуль «Анализатор», предназначенный для ведения контроля качества ГСМ и управления образцами, модуль «Освежение» для управления запасами



ГСМ и модуль «Прейскурант», представляющий собой систему расчета стоимости определения показателей качества ГСМ.

В качестве примера реализации принципов процессного системного подхода на рис. 1 показана схема функциональной структуры для модуля «Анализатор», разработанная в начале работ над E-Lab ГСМ. Здесь на входе в систему имеется образец для исследования, поступивший в лабораторию на испытания. Образец заносится в журнал регистрации проб и образцов. Испытания на рабочем месте проводятся в соответствии с нормативно-правовыми актами и нормами качества; результаты заносятся в соответствующий журнал испытаний, далее, возможно, в журнал некондиции и т. д. В случае успешных испытаний выдается паспорт (протокол испытаний). При необходимости может быть выдан запрос на повторные испытания.

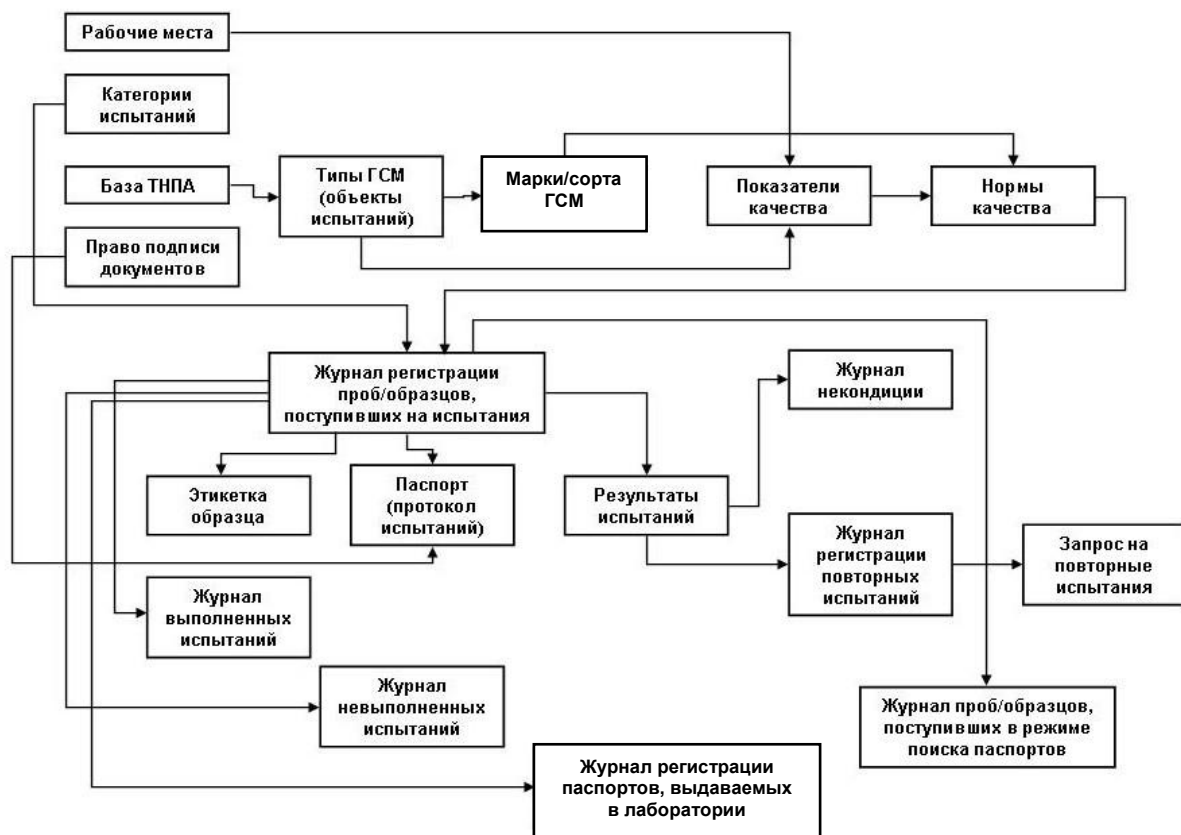


Рис. 1. Схема функциональной структуры модуля «Анализатор»

Вместе с тем следует отметить, что согласно [12] более правильно разрабатывать схему функциональной структуры в нотации IDEF0 в соответствии с РД IDEF0–2000 «Методология функционального моделирования IDEF0». Данная система отражает информационные связи между элементами (подсистемами) ИС и внешней средой, определяет место подсистем ПО ИС в информационных потоках организации.

Рассмотрим схему функциональной структуры информационной системы сотрудника Госатомнадзора для обеспечения контроля (надзора) в области ядерной и радиационной безопасности (рис. 2) в нотации IDEF0.

Информационные связи между системой и внешней средой осуществляются посредством поступающих в систему извне либо формируемых внутри Госатомнадзора документов (в бумажном или электронном виде) различного типа: сведений, поручений вышестоящих респуб-

ликанских органов государственного управления; сообщений и обращений международных организаций; предложений контролирующих (надзорных) органов, планов мероприятий, решений рабочих групп; заявок на выдачу (внесение изменений, прекращение действия) разрешений (лицензий) и т. д. Все типы входящих документов регламентированы законодательством.

Система на выходе во внешнюю среду выдает формируемые в электронном виде отчеты с уведомлениями о проведении проверки, письма по результатам рассмотрения отчетных документов проверяемых организаций, акты (справки) о проведении проверки, предписания об устранении нарушений, предписания о приостановке (запрете) деятельности и т. д.

На рис. 2 показана схема верхнего уровня. Далее следует схема функциональной структуры системы «Осуществлять деятельность для обеспечения контроля (надзора) в области ядерной и радиационной безопасности» (рис. 3), за ней – функциональная схема процесса следующего уровня «Выполнить контроль (надзор) за обеспечением безопасности при сооружении и вводе в эксплуатацию Белорусской АЭС» и т. д. Все схемы связаны между собой, при этом схема на рис. 3 следует из схемы на рис. 2.

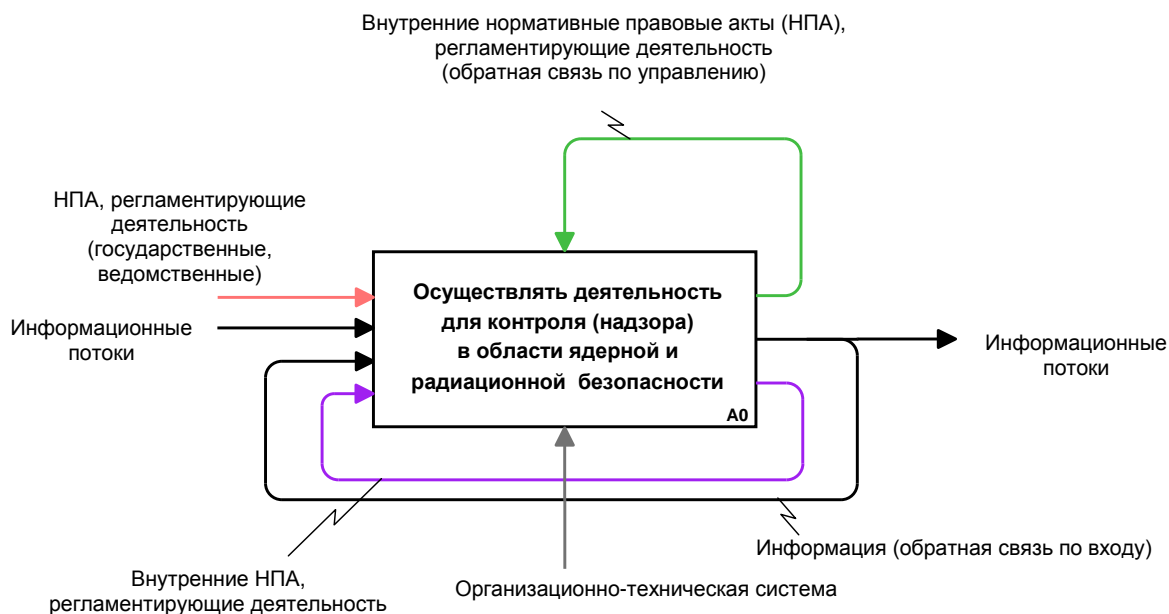


Рис. 2. Информационная система сотрудника Госатомнадзора для обеспечения контроля (надзора) в области ядерной и радиационной безопасности

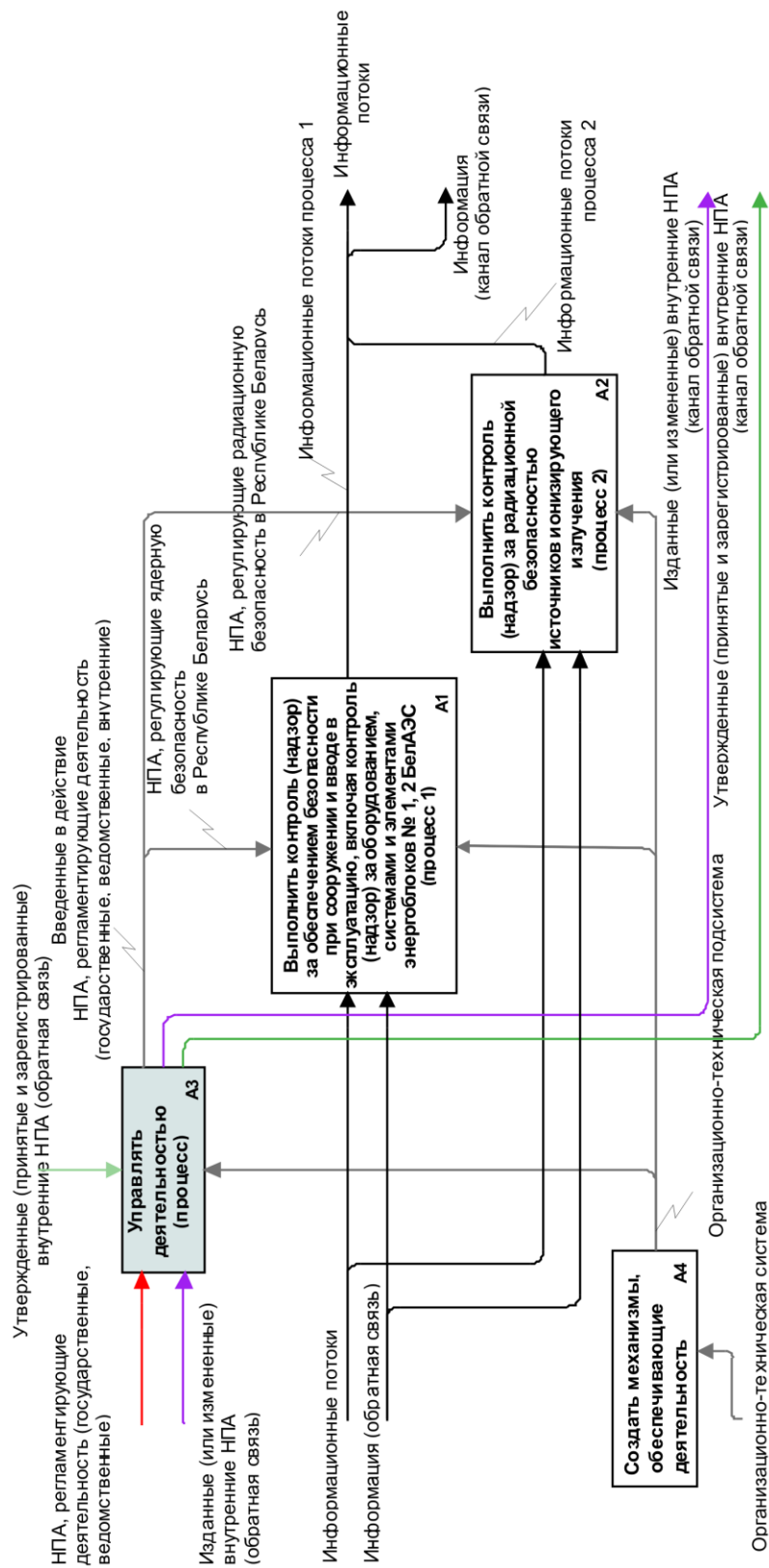


Рис. 3. Осуществление деятельности по обеспечению контроля (надзора) в области ядерной и радиационной безопасности

## 2. Состав программного обеспечения

Система размещается на виртуальной машине (ВМ) сервера VMWare ESX, возможно ее размещение на физическом сервере. Сервер системы – программно-аппаратный комплекс для выполнения следующих компонентов системы: веб-сервера Apache, сервера приложений PHP5, SQL-сервера Firebird 2.5.

На рис. 4 показано, что пользователи могут работать как внутри корпоративной сети, так и с удаленных рабочих мест через Интернет и при необходимости – с использованием виртуальной частной сети VPN (от англ. Virtual Private Network).

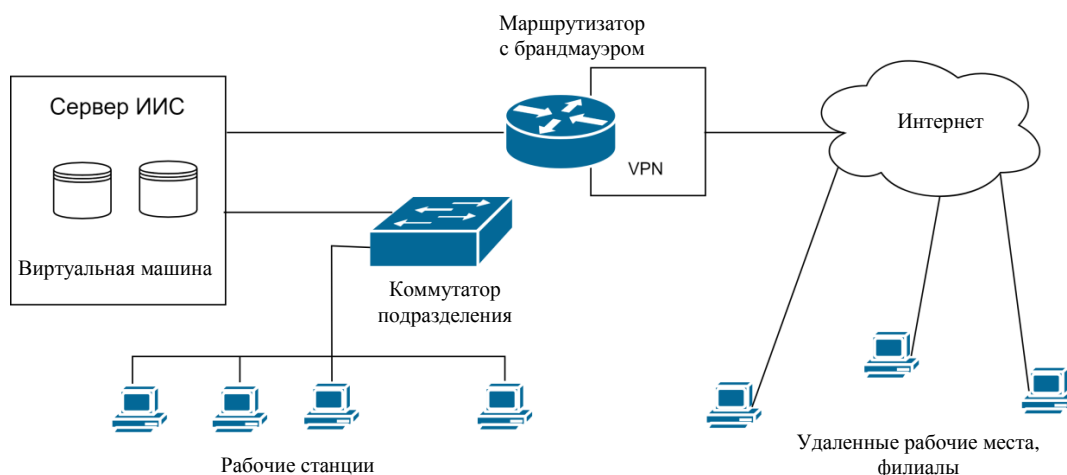


Рис. 4. Структура сети системы eLab

Согласно организационной структурной схеме ПО (рис. 5) ВМ представляет собой веб-сервер Apache и хранилище БД.

Корневая директория (system) содержит библиотеки сторонних разработчиков (adodb, Ajax) и собственный код, представленный в следующих папках:

system/core – основные файлы систем (библиотеки классов и функций);

system/common – готовые компоненты системы для использования (вставки) в различные визуальные представления (страницы) без дублирования соответствующего кода;

system/eventlog – библиотека для вывода ошибок и отладочных сообщений;

system/special – специальные модули;

system/etc – папка, в которой в зашифрованном виде хранится строка подключения к системной БД.

Ядро core системы eLab содержит модули PHP, JavaScript и CSS, которые обеспечивают общую функциональность системы для всех пользователей в едином формате: аутентификацию, дизайн страниц, пользовательские элементы управления (кнопки, списки, таблицы), шаблоны, генераторы отчетов и др. Ядро вместе со специализированными модулями обеспечивает централизованную валидацию входных данных (HTTP-запросы) и выходных (HTTP-ответы), защиту от внедрения несанкционированного кода, аутентификацию пользователей и доступ к контенту в соответствии с установленными разрешениями для соответствующих пользователей. Основными назначениями ядра являются централизованная и быстрая генерация контента страниц для отображения их в разных обозревателях в соответствии с хранимыми данными, реакция на события от разных пользователей и соответствующая модификация контента и хранимых данных. Содержимое страниц зависит от поступающих запросов и согласовано с базой данных соответствующего программного продукта.

Логика программы такова, что файл инициализации module.ini представляет собой начальное состояние конфигурации, которое перекрывается соответствующими конфигурационными данными из базы данных. Администратор системы может изменять конфигурацию путем модификации данных в БД (системная база данных, таблица configuration). Для этого в списке модулей системы имеется модуль configuration\_management.

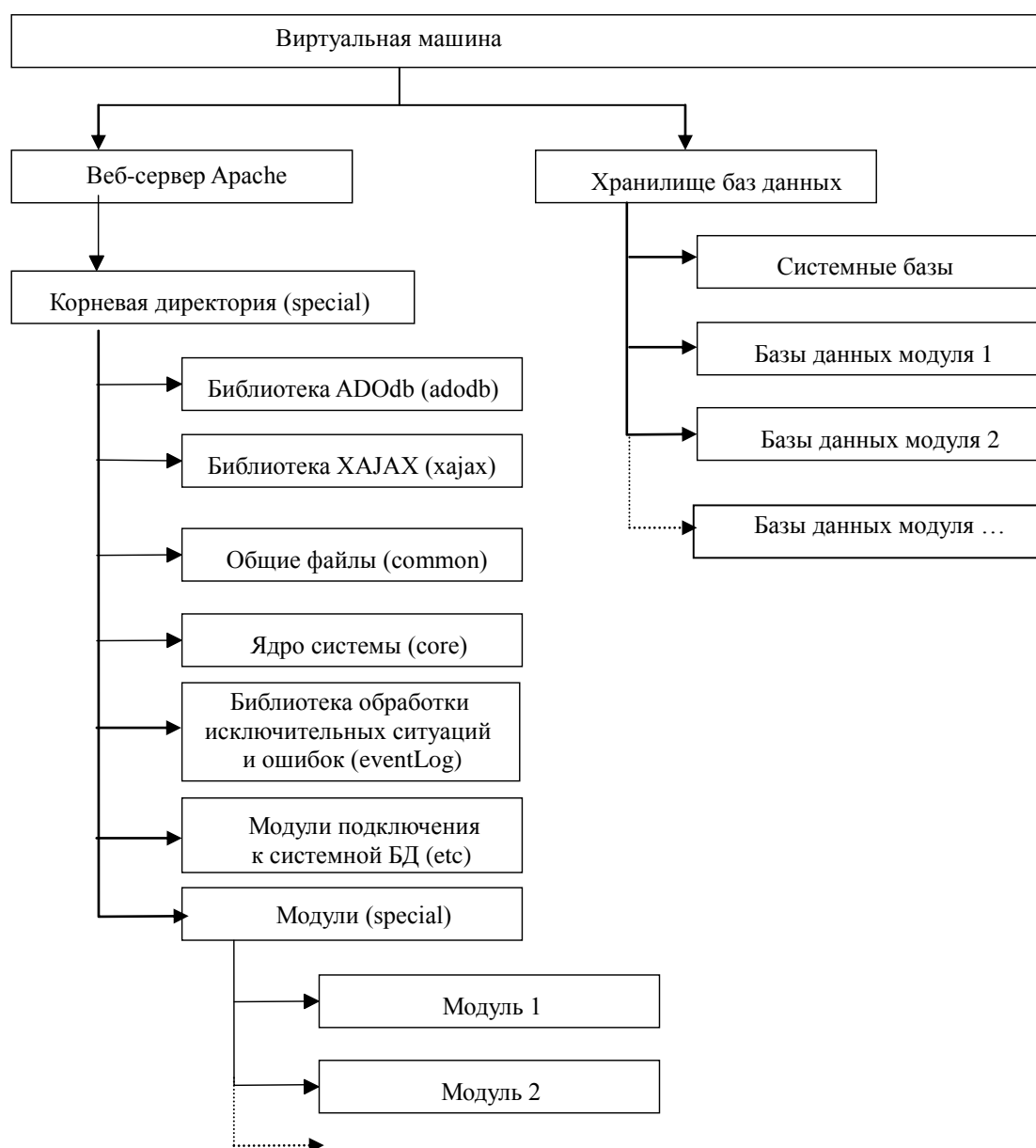


Рис. 5. Организационная структурная схема ПО eLab

Иерархия базовых классов представлена на рис. 6. При старте приложения создается объект `application`, который собирает всю информацию о модулях системы, формирует автоматически ссылки, вычитывает и применяет конфигурации к модулям, создает `webpage` – страницу документа, которая формирует соответствующий HTML-документ.

Элементы управления `forms`, `toolbar`, `tree` и др. (за исключением `captcha`) являются наследниками класса `control`. Класс `customform` (`forms/customform.php`) наследуется от `webpage` и формирует базовый каркас для всех страниц системы. Специфика наполнения и поведения задается классом `mainform` (потомком `customform`), который определяется в ветках `system/special`. Пользовательские элементы из `system/common` создаются таким образом, чтобы их можно было использовать многократно без дублирования кода. У каждого элемента имеются свои ресурсы (`images`, `styles` и `javascripts`), которые при необходимости подгружаются вместе с элементом автоматически. Класс `mainform` (потомок `customform`) включает и инициализирует `xajax`-обработку.

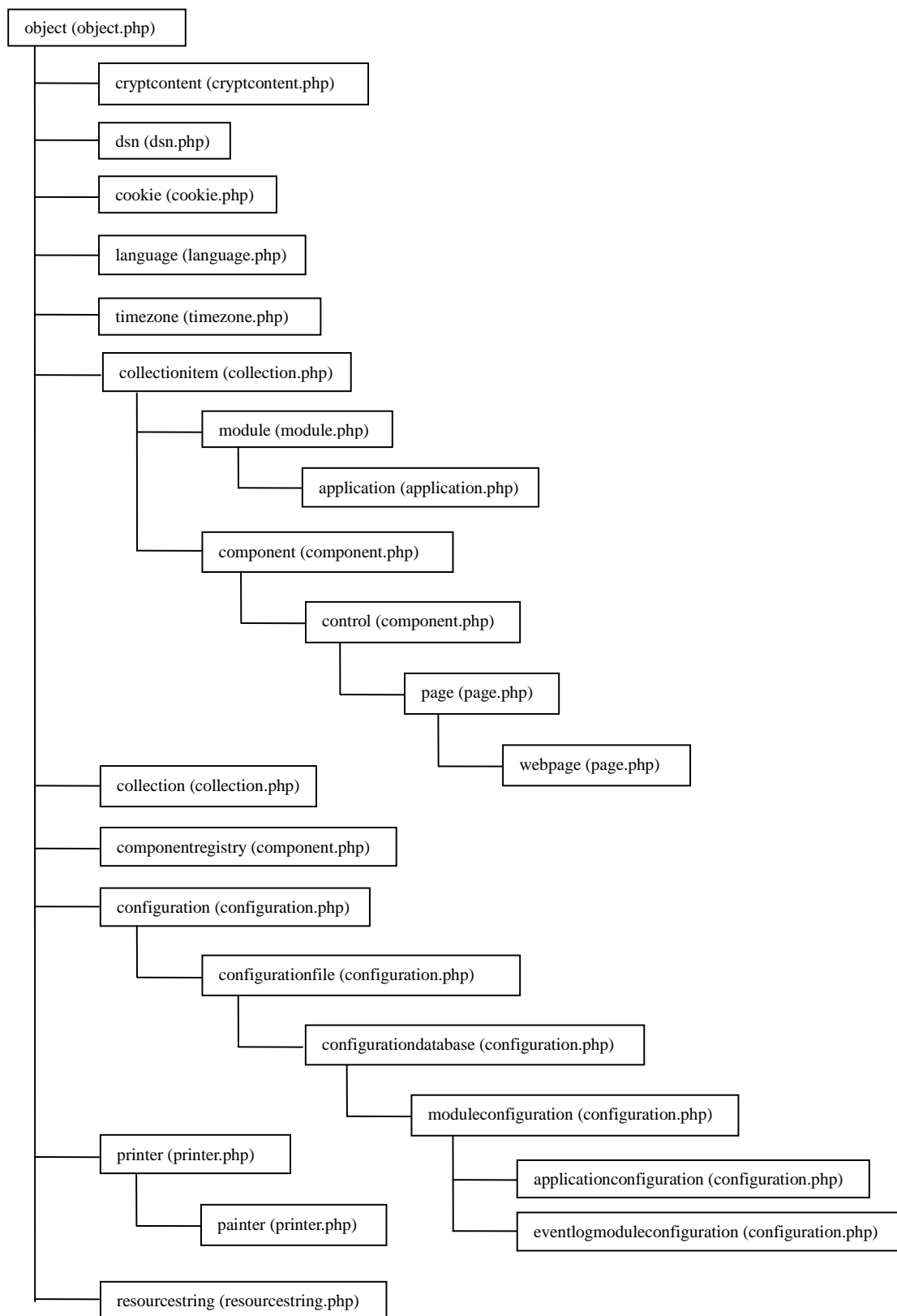


Рис. 6. Иерархия базовых классов

### 3. Вопросы безопасности в системе

Требования к безопасности в системе eLab, учитывая ее внедрение в Вооруженных Силах Республики Беларусь и Госатомнадзоре, повышены и реализованы следующим образом. Во-первых, в системе eLab обеспечен доступ по протоколу HTTPS. Во-вторых, организован удаленный доступ сотрудников к рабочему месту через VPN. В результате существенно повышена скорость доступа и обеспечен доступ к системе с поддержкой шифрования в целях повышения безопасности.

Для публичных серверов (BeINET и CoExAN) доступ по протоколу HTTPS обеспечен сертификатом веб-сервера, подписанным компанией LetsEncrypt, которая работает под патронажем EFF (Electronic Frontier Foundation). Здесь разработанный протокол ACME позволяет безопасным образом подтвердить, что человек (организация), запрашивающий сертификат, обладает контролем над сервером и позволяет периодически обновлять сертификат или корректно его отзывать. Для получения сертификата LetsEncrypt на сервер было установлено ПО, реализующее протокол ACME – certbot. Данное ПО периодически выполняется, проверяя списки отзыва сертификатов, и при приближении сертификата к окончанию срока действия автоматически размещает запрос на создание нового.

Для частных серверов сертификат веб-сервера выдается по запросу (CSR), сформированному администратором виртуальной машины. Требуемое современными браузерами поле сертификата SAN (Subject Alternative Name) указывается при формировании запроса на стороне сервера информационной системы. Запрос на выдачу сертификата в соответствии с шаблоном (web-Server) обрабатывается центром авторизации (ЦА) домена Windows AD.

Реализация VPN осуществляется следующим образом. Сервер eLab выполняется на ВМ в пределах сервера VMWare. Последний подключен к коммутатору и доступен для сотрудников с рабочих станций. Он также подключен к VPN с обеспечением на брандмауэре доступа только к одному порту HTTPS (443). Все остальные порты должны быть заблокированы. Аутентификация пользователей удаленных рабочих мест возможна при наличии сертификата VPN с ограниченным сроком действия и знании пароля сертификата, а также имени пользователя и пароля eLab.

Отметим, что использование VPN-компонента сетевой инфраструктуры не является обязательным. Решение о его использовании должно приниматься руководством организации-пользователя системы на основе анализа рисков несанкционированного доступа и функционирования инфраструктуры частных ключей для удаленных пользователей и филиалов.

Еще одной составляющей безопасности в системе является реализация алгоритма безопасного подключения к базам данных.

При подключении к базам данных системы адрес ресурса URL HTTP(S)-запроса от клиента к серверу веб-приложений и конфигурация данного сервера однозначно определяют файл ресурса. Если ресурс является, например, HTML-файлом или простым текстовым файлом, то содержимое этого файла «как есть» попадает в HTTP(S)-ответ, который уходит к клиенту. Если в качестве ресурса указан PHP-файл, то сервер веб-приложений запускает процесс интерпретатора PHP, в котором исполняется PHP-код из файла ресурса. Результатом работы интерпретатора является HTML-текст, отправляемый клиенту HTTP(S)-ответом.

Если для формирования ответа требуется информация из базы данных, то файл ресурса должен содержать PHP-код подключения к БД, в котором указывается имя БД, имя пользователя БД и пароль. Так как PHP-код является открытым (некомпилируемым), то простой просмотр файла ресурса любым текстовым редактором позволит узнать учетную запись пользователя сервера БД. Для исключения этой возможности имя БД и учетную запись пользователя БД нельзя задавать в явном виде. В eLab параметры подключения к БД в зашифрованном виде хранятся в отдельном конфигурационном файле системы (модуль etc), считываются при необходимости, расшифровываются и поступают в процедуру подключения в качестве входных параметров.

В конфигурационном файле зашифрован безопасный (гостевой) логин к БД, с помощью которого можно выполнить только одну хранимую в БД процедуру. Доступ к другим объектам и данным для данного логина ограничен. Указанная процедура принимает на входе идентифи-

кационные параметры пользователя ИС и возвращает новый логин с расширенными правами доступа к БД, который закрепляется за пользователем ИС в случае удачной аутентификации и в дальнейшем используется для доступа этого пользователя к БД. Указанные логины с расширенными правами недоступны в явном виде для пользователя ни на стороне клиента, ни на стороне сервера приложений.

В результате использования трех составляющих безопасности существенно повышена скорость доступа и обеспечен доступ к системе с поддержкой шифрования в целях повышения безопасности.

#### **4. Инсталляция системы eLab**

Приведем описание последовательности действий при установке всех компонентов системы eLab вручную с указанием особенностей конфигурации. Два главных этапа – это установка и настройка ВМ и установка на ВМ ПО системы.

Для реализации системы eLab существует только одно обязательное требование к аппаратному обеспечению – наличие адаптера локальной сети Интернет. Остальные требования к аппаратному обеспечению влияют только на быстродействие системы. Для развертывания машины можно использовать системы виртуализации, не требующие приобретения лицензий, – VMware player 12.0 и Oracle Virtualbox 5.1. Первая поддерживает формат виртуальных дисков «VMDK». Для переноса машины необходим только файл описания машины «.VMX» («.XML») и файл виртуального диска. Oracle Virtualbox 5.1 поддерживает формат виртуальных дисков «.VDI» и «.VMDK». Для переноса возможен экспорт в формат «.OVA» («.OVF»).

При эксплуатации сервера eLab под управлением Windows перенос самой ВМ (описания аппаратуры) критичен, так как для ядра Windows изменение типа контроллера диска приводит к недоступности загрузочного диска и остановке. При эксплуатации сервера eLab под управлением Linux перенос можно осуществить, переместив образ виртуального диска. Для развертывания системы был выбран комбинированный способ – диск формата «.VMDK» в ВМ VirtualBox, что позволило обеспечить максимальную гибкость управления и миграции.

Для конфигурации сервера eLab был выбран дистрибутив Debian GNU/Linux 8.2 (stable). Причины выбора: открытое, бесплатное, свободное ПО высокого качества, которое поддерживается ведущими производителями аппаратного (Hewlett Packard, Dell) и программного обеспечения (Canonical и др.); наличие двух официальных постоянно действующих зеркал дистрибутива в Республике Беларусь (mirror.datacenter.by и ftp.mgts.by). Дистрибутив используется Национальным интернет-провайдером «Белтелеком», институтами НАН Беларуси и др.

Алгоритм установки программного обеспечения состоит из следующих шагов:

1. Установить веб-сервер Apache 2.4.
2. Установить сервер приложений PHP 5.6.
3. Установить SQL-сервер Firebird 2.5.
4. Провести тестирование в модельном (рабочем) окружении.
5. Осуществить экспорт ВМ.
6. Осуществить импорт ВМ.
7. Настроить ВМ в рабочем окружении.
8. Провести настройку аутентификации Active Directory (AD) Kerberos в Apache 2.4.

Для тестирования системы аутентификации разворачивается виртуальный сервер контроллера домена (Windows 2008R2 Server Active Directory). Веб-сервер настраивается на аутентификацию в AD, где создаются тестовые пользователи, которые вносятся в группы AD, соответствующие модели безопасности eLab. Под именем каждого из этих пользователей производится вход в eLab и тестирование функциональности системы в соответствии с инструкциями рабочих мест пользователей каждой группы.

Экспорт ВМ осуществляется штатными средствами используемой системы виртуализации. Минимально возможный вариант действий – перенести образ диска «.VMD» и создать новую машину на платформе потребителя с указанным образом диска. Импорт ВМ с развернутой системой eLab производится штатными средствами системы виртуализации потребителя.



Настройка в рабочем окружении требует выполнения следующих шагов, часть которых выполняется для виртуальной машины, а часть – для сетевого окружения:

1. Задать статический IP-адрес, желательно также задать IPv6-адрес (выполняется на VM).
2. Создать прямую и обратную DNS-записи на сервере DNS.
3. Создать сертификат сервера в ЦА потребителя и осуществить его безопасную установку на машину.
4. Провести настройку аутентификации веб-сервера на сервер Kerberos AD.
5. Провести настройку веб-приложения на сервер LDAP AD.
6. Провести тестирование HTTPS.
7. Провести тестирование аутентификации в AD.
8. Осуществить распространение публичного сертификата ЦА в список доверенных сертификатов рабочих станций AD.

## 5. Повышение функциональности информационной системы

Повышение функциональности ИС eLab напрямую связано с использованием блочной модели БД. В этой модели БД ИС организации представляет собой множество взаимосвязанных блоков – специализированных БД [14]. Специализация блока определяется решаемыми задачами. Например, существуют БД сотрудников, БД управления организационной структурой, БД оборудования и т. д.

Специализированные блоки, в свою очередь, могут состоять из блоков более низкого уровня, например блоков управления пользователями, блоков регистрации изменений и т. д. Блоки должны быть максимально функционально завершенными. Функциональные блоки распределяются между структурными единицами организации.

Перечислим достоинства блочной модели БД. Она позволяет разрабатывать отдельные блоки независимо от всего проекта, легче обновлять и заменять существующие блоки новыми, строить из готовых блоков другие БД, ориентированные на различные процессы. Также данная модель способствует равномерному распределению нагрузки на сервер БД (блоки могут быть разнесены на разные серверы), уменьшению размеров отдельных файлов БД, упрощению наименований объектов БД (таблиц, просмотров и т. д.), упрощению понимания структуры БД.

Повышение функциональности ИС также достигается за счет использования алгоритма генератора отчетов, в котором пользователь формирует шаблон отчета самостоятельно с помощью ключей вида \$KEY, где \$ – специальный символ, KEY – название ключа. В процессе работы шаблонный файл разбирается и производится замена найденных ключей на соответствующую информацию из БД. Таким образом, пользователь имеет возможность изменить содержание и форму отчетных документов, выдаваемых системой.

Для повышения функциональности системы предложен и реализован алгоритм полнотекстового поиска в БД по файлам типа «.PDF», а также различным файлам таких программных продуктов, как MS Office и Libre Office.

Данные два алгоритма будут описаны в следующей статье.

## Заключение

Описанные и реализованные в ИС eLab алгоритмы, повышающие ее безопасность и функциональность, а также многолетняя бесперебойная работа системы E-lab ГСМ показывают, что система eLab представляет собой хорошо проработанный программный продукт, находящийся в постоянной эксплуатации, легко модифицируемый и адаптируемый под условия проекта. Данная система является ярким примером корпоративных приложений [15] и разрабатывается в точном соответствии с основными принципами и идеями создания таких приложений.

Работа выполняется в рамках задания 1-02 ГНТП «Интеллектуальные информационные технологии».

**Список литературы**

1. What is free software? GNU Operating System [Electronic resource]. – 2017. – Mode of access : <https://www.gnu.org/philosophy/free-sw.html>. – Date of access : 15.05.2017.
2. Система контроля качества и управления запасами горюче-смазочных материалов / С.В. Черепица [и др.] // Междунар. конгресс по информатике: информационные системы и технологии (CSIST'2011) : материалы конгресса. – Минск : Изд-во БГУ, 2011. – С. 223–227.
3. Белорусское программное обеспечение для автоматизации систем учета и контроля в Вооруженных Силах Республики Беларусь / С.Н. Сытова [и др.] // 7-я Междунар. науч. конф. по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения : сб. науч. статей. – Минск : Четыре четверти, 2017. – С. 213–222.
4. Сытова, С.Н. Применение фреймворка eLab в атомной энергетике / С.Н. Сытова, А.С. Лобко, С.В. Черепица // Доклады IV Междунар. конф. «Ядерные технологии XXI века» (Минск, 21–23 октября 2014 г.) / Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси. – Минск : Право и экономика, 2014. – С. 18–23.
5. Фреймворк eLab для широкого круга приложений / С.Н. Сытова [и др.] // Фундаментальные и прикладные физические исследования 2010–2016 гг. – Минск : Изд-во БГУ, 2016. – С. 388–399.
6. Принципы формирования контента учебно-научного портала ядерных знаний BelNET / С.Н. Сытова [и др.] // Фундаментальные и прикладные физические исследования 2010–2016 гг. – Минск : Изд-во БГУ, 2016. – С. 400–417.
7. Контент учебно-научного портала ядерных знаний BelNET / С.Н. Сытова [и др.] // Высшая школа. – 2016. – № 5. – С. 22–27.
8. ISO 9001:2015 Quality management systems – Requirements [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9001:ed-5:v1:en>. – Дата доступа : 15.05.2017.
9. ISO/IEC DIS 17025:2016(E). General requirements for the competence of testing and calibration laboratories [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.iso.org/standard/66912.html>. – Дата доступа : 15.05.2017.
10. Репин, В.В. Процессный подход и современные системы управления / В.В. Репин, В.Г. Елиферов. – М. : Манн, Иванов и Фербер, 2013. – 544 с.
11. Кирисов, С.В. Теория и практика применения процессного подхода к управлению качеством деятельности организации / С.В. Кирисов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 80 с.
12. Марка, Д.А. Методология структурного анализа и проектирования SADT / Д.А. Марка, К.М. МакГоуэн. – М. : Метатехнология, 1993. – 240 с.
13. Янг, С. Системное управление организацией / С. Янг. – М. : Сов. радио, 1972. – 456 с.
14. Block oriented processing of relational database operations in modern computer architectures / S. Padmanabhan [et al.] // Proc. of the 17th Intern. Conf. on Data Engineering. – Heidelberg, Germany, 2001. – P. 567–574.
15. Фаулер, М. Архитектура корпоративных программных приложений / М. Фаулер. – М. : Изд. дом «Вильямс», 2007. – 544 с.

Поступила 04.07.2017

*Институт ядерных проблем  
Белгосуниверситета,  
Минск, ул. Бобруйская, 11  
e-mail: sytova@inp.bsu.by*

**S.N. Sytova, A.P. Dunets, A.N. Kovalenko,  
A.L. Mazanik, T.P. Sidorovich, S.V. Charapitsa**

**INFORMATION SYSTEM ELAB FOR ACCREDITED  
TESTING LABORATORIES**

The basic principles of organization and algorithms of information system eLab operation for accredited testing laboratories based on free software are described. The system runs under Windows and Linux. The work is carried out through the Web-interface in multi-user mode with the sharing the access rights through widely distributed browsers installed on the users' desktops. The software composition, problems of security and the enhancement of the functionality of the system, as well as the organizational chart of the software and the hierarchy of basic classes are discussed in detail. The algorithm of secure connection to the database and the algorithm for installation of the system software on the server are given.

## ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ, ИЗОБРАЖЕНИЙ И РЕЧИ

УДК 004.942

В.М. Артемьев, А.О. Наумов, Л.Л. Кохан

ФИЛЬТРАЦИЯ СИГНАЛОВ ПРИ ВНЕЗАПНЫХ ОТКАЗАХ ДАТЧИКОВ  
НА ОСНОВЕ РЕКУРРЕНТНОГО ПОДХОДА НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ

*Предлагается методика синтеза отказоустойчивых фильтров с резервированием датчиков на основе рекуррентного метода наименьших квадратов (детерминированного подхода). Ее реализация позволяет получать простые алгоритмы фильтрации с обнаружением отказа датчиков и осуществлять перестройку структуры фильтра, обеспечивающую его работоспособность.*

## Введение

Под отказоустойчивостью понимается способность системы к сохранению работоспособного состояния при наличии отказов ее элементов [1]. Обеспечение отказоустойчивости достигается путем введения аппаратной или информационной избыточности, что приводит к двум способам ее реализации: путем резервирования элементов или алгоритмическим путем. В настоящей работе рассматривается методика решения задачи отказоустойчивой фильтрации при резервировании датчиков одного и того же сообщения, которые могут работать на различных физических принципах.

Решение сводится к обнаружению канала с отказом, его исключению и изменению структуры или параметров фильтра для обеспечения дальнейшей работы. На рис. 1 показаны измерительная система с  $N$  датчиками сигнала  $\mathbf{x}_k$ , результаты измерений  $\mathbf{z}_k$  с ошибками (шумами)  $\mathbf{v}_k$ , а также фильтр с выходным сигналом  $\hat{\mathbf{x}}_k$  и перестраиваемой структурой или параметрами. При обнаружении отказа соответствующий датчик отключается и производится изменение структуры или параметров фильтра.

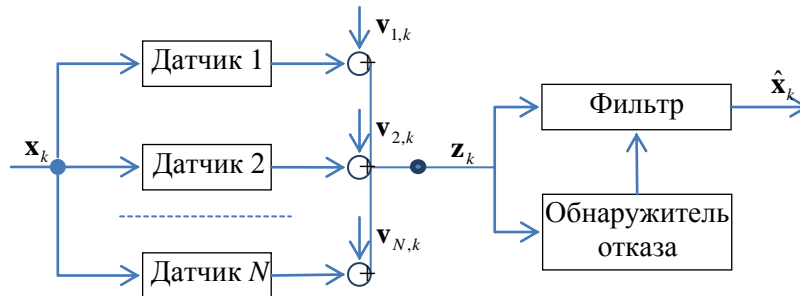


Рис. 1. Блок-схема отказоустойчивого фильтра

Отказы могут быть постепенными, когда чувствительность датчика снижается в течение определенного времени, и внезапными при резком ее уменьшении. В настоящей работе рассматривается только случай внезапных отказов с их обнаружением по результатам измерений.

Рассмотрению задач фильтрации в условиях отказов датчиков посвящено значительное число публикаций, приведенных, в частности, в обзорах [2, 3]. Общая методика решения задач такого рода изложена в публикациях по теории систем со случайной структурой [4, 5]. В имеющихся работах используется статистический подход, в том числе на основе методологии фильтра Калмана (ФК). Такой подход имеет ограничения, состоящие в том, что алгоритмы отказоустойчивой фильтрации оказываются сложными и их реализация требует больших вычислительных затрат. Это затрудняет решение в реальном масштабе времени. При статистическом подходе критерием оптимальности является минимизация дисперсии ошибки фильтрации на основе измерений, априорных и апостериорных статистических данных. Последнее приводит к необходимости выполнения операций нахождения апостериорных статистических характеристик, что и усложняет структуру алгоритма.

Для преодоления этих ограничений можно использовать детерминированный подход [6], позволяющий решать задачу синтеза фильтра на основе применения лишь априорных данных и текущих измерений без использования апостериорных, что и снижает трудоемкость решения. В его основе может лежать рекуррентный метод наименьших квадратов (РМНК), сущность которого состоит в применении критерия оптимальности на основе невязки текущего решения и оценок на предыдущем шаге [7]. Естественно, что синтезированный по этому критерию фильтр наименьших квадратов (ФНК) уже не будет оптимальным по отношению к величине дисперсии ошибки фильтрации, однако даст выигрыш по объему вычислительных затрат, что особенно важно для задач высокой размерности.

В работе используется детерминированный подход к синтезу ФНК при резервировании датчиков с обнаружением положения и момента отказа. Рассматривается методика нахождения уравнений фильтра и обнаружителя отказов, а также направление изменения параметров фильтра с целью сохранения его работоспособности.

### 1. Уравнения ФНК

Полезный сигнал  $\mathbf{x}_k$  является случайной последовательностью в виде  $m$ -мерного вектора  $\mathbf{x}_k = [x_{1,k}, x_{2,k}, \dots, x_{m,k}]^T$ , где  $k = 0, 1, 2, \dots$  есть дискретное время, а символ « $T$ » обозначает операцию транспонирования. Модель сигнала задается линейным стохастическим конечно-разностным уравнением вида

$$\mathbf{x}_k = A_k \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{w}_k, \tag{1}$$

где  $A_k$  – матрица размерности  $m \times m$ , а случайный  $m$ -мерный вектор  $\mathbf{w}_k = [w_{1,k}, w_{2,k}, \dots, w_{m,k}]^T$  есть формирующее воздействие модели полезного сигнала в виде централизованного дискретного белого шума с ковариационной матрицей  $Q_k$ . Поскольку задача линейная, учет математического ожидания в уравнении (1) не представляет труда.

Каждая компонента вектора  $x_{i,k}$ ,  $i = \overline{1, m}$ , измеряется посредством параллельного включения  $n_i$  безынерционных линейных датчиков, образующих измерительную матрицу  $H_k$  диагонального типа размерности  $N \times m$ ,  $N = \sum_{i=1}^m n_i$  (рис. 2).

$$H_k = \left| \begin{array}{ccc|c} \cdot & \cdot & 0 & 0 \\ & h_{j+1,i,k} & \vdots & 0 \\ 0 & h_{j+n_i,i,k} & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \cdot & \cdot \end{array} \right| \begin{array}{c} \updownarrow \\ n_i \end{array}$$

Рис. 2. Структура матрицы измерений

Коэффициенты матрицы  $h_{j,i,k}$  ( $j = \overline{1, N}$ ,  $i = \overline{1, m}$ ) являются коэффициентами чувствительности датчиков. Их выходные сигналы измеряются с ошибками (шумами)  $v_{j,k}$ , вектор которых  $\mathbf{v}_k = [v_{1,k}; v_{2,k}; \dots; v_{N,k}]^T$  имеет размерность  $N$  и ковариационную матрицу  $R_k$ . Векторы  $\mathbf{v}_k$

и  $\mathbf{w}_k$  полагаются статистически независимыми. В результате вектор выходных сигналов датчиков размерности  $N$   $\mathbf{z}_k = [z_{1,k}; z_{2,k}; \dots; z_{N,k}]^T$  определяется уравнением  $\mathbf{z}_k = H_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k$ .

Задача заключается в нахождении уравнений текущей оценки вектора полезного сигнала  $\hat{\mathbf{x}}_k = [\hat{x}_{1,k}, \hat{x}_{2,k}, \dots, \hat{x}_{m,k}]^T$  на основе выбранного критерия оптимальности и текущих измерений  $\mathbf{z}_k$  методом РМНК.

Существует два подхода к решению задачи фильтрации с резервированием датчиков сигналов: централизованный и децентрализованный. В первом случае производится первоначальное объединение сигналов каждого из датчиков с последующей одноканальной фильтрацией, во втором случае – многоканальная фильтрация выходов каждого из датчиков, а затем объединение результатов. Каждая из этих схем имеет свои преимущества и недостатки. В данной работе решается задача синтеза централизованного варианта фильтрации.

В основе методики синтеза лежит выбор функционала потерь  $J_k(\hat{\mathbf{x}}_k)$ . Для классического метода наименьших квадратов в качестве функционала используется квадратичная форма невязки (КФН)  $(\mathbf{z}_k - H_k \hat{\mathbf{x}}_k)^T R_k^{-1} (\mathbf{z}_k - H_k \hat{\mathbf{x}}_k)$  [7], где символ « $-1$ » обозначает операцию обращения матрицы. Этот функционал зависит лишь от текущих оценок и не зависит от предыдущих, что не дает возможности получения рекуррентных оценок. При использовании РМНК требуется расширение КФН путем включения сглаживающей квадратичной формы, зависящей от предыдущих оценок. Ее выбор производится исходя из сущности решаемой задачи. Для сформулированных выше исходных данных подходящим вариантом является квадратичная форма  $(\hat{\mathbf{x}}_k - A_k \hat{\mathbf{x}}_{k-1})^T Q_k^{-1} (\hat{\mathbf{x}}_k - A_k \hat{\mathbf{x}}_{k-1})$ , вытекающая из модели полезного сигнала (1). В результате функционал потерь выглядит следующим образом:

$$J_k(\hat{\mathbf{x}}_k) = (\mathbf{z}_k - H_k \hat{\mathbf{x}}_k)^T R_k^{-1} (\mathbf{z}_k - H_k \hat{\mathbf{x}}_k) + (\hat{\mathbf{x}}_k - A_k \hat{\mathbf{x}}_{k-1})^T Q_k^{-1} (\hat{\mathbf{x}}_k - A_k \hat{\mathbf{x}}_{k-1}).$$

Этот функционал определяет текущие потери фильтрации в детерминированной постановке, и его можно трактовать следующим образом: первое слагаемое учитывает влияние измерений  $\mathbf{z}_k$  на качество решения  $\hat{\mathbf{x}}_k$ , второе позволяет согласовать его с решением  $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}$  на предыдущем шаге фильтрации с учетом модели (1).

Критерием оптимальности служит минимизация функционала потерь  $\min_{\hat{\mathbf{x}}_k} J_k(\hat{\mathbf{x}}_k)$ , необходимое условие которого представляется в виде уравнения

$$\frac{\partial J_k(\hat{\mathbf{x}}_k)}{\partial \hat{\mathbf{x}}_k} = -2H_k^T R_k^{-1} (\mathbf{z}_k - H_k \hat{\mathbf{x}}_k) + 2Q_k^{-1} (\hat{\mathbf{x}}_k - A_k \hat{\mathbf{x}}_{k-1}) = 0. \quad (2)$$

Его решение приводит к уравнению оптимального одноканального ФНК

$$\hat{\mathbf{x}}_k = K_{1,k} A_k \hat{\mathbf{x}}_{k-1} + K_{0,k} \mathbf{z}_k. \quad (3)$$

Здесь матричный коэффициент  $K_{1,k}$  размерности  $m \times m$  имеет форму

$$K_{1,k} = (Q_k^{-1} + H_k^T R_k^{-1} H_k)^{-1} Q_k^{-1} \quad (4)$$

и задает экстраполяцию оценки  $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}$  на следующий шаг. Матричный коэффициент усиления  $K_{0,k}$  размерности  $(m \times N)$  определяется равенством

$$K_{0,k} = (Q_k^{-1} + H_k^T R_k^{-1} H_k)^{-1} H_k^T R_k^{-1} \quad (5)$$

и позволяет уточнить экстраполированное значение за счет наблюдения  $\mathbf{z}_k$  на текущем шаге фильтрации. Структура уравнения (3) говорит о рекуррентном характере фильтрации. Резерви-

рование учитывается величиной  $N$ . При отказе одного из датчиков эта величина изменяется, тем самым меняются значения коэффициентов усиления, что и приводит к изменению параметров оптимального фильтра. Путем эквивалентных преобразований уравнение (3) сводится к структуре фильтра:

$$\hat{\mathbf{x}}_k = K_{1,k}^* \hat{\mathbf{x}}_{k-1} + K_{0,k}^* (\mathbf{z}_k - H_k K_{1,k}^* \hat{\mathbf{x}}_{k-1}), \quad (6)$$

где

$$K_{1,k}^* = A_k, \quad K_{0,k}^* = K_{0,k}. \quad (7)$$

В данном случае структура ФНК и первое слагаемое в формуле (6), определяющие экстраполяцию оценки, совпадают с ФК. Коэффициенты усиления ФНК находятся по формулам (4), (5) или (7), в то время как у ФК это требует решения ковариационного уравнения совместно с уравнением для оптимального коэффициента усиления, что более трудоемко.

## 2. Уравнения обнаружителя отказов

Одновременно с решением задачи фильтрации осуществляется обнаружение отказов в каждом из  $N$  каналов датчиков, поэтому уравнения обнаружителя формируются для каждого из них в отдельности. При этом все сигналы обнаружителя скалярные, включая измеренный  $z_{j,k}$ ,  $j = \overline{1, N}$ . Для сокращения записи символ  $j$  в дальнейшем опускается.

При отказе датчика уровень помех, как правило, возрастает. Обозначим их через  $v_{от,k}$  с дисперсией  $\sigma_{от,v,k}^2$ , величина которой может отличаться от  $\sigma_{v,k}^2$  в режиме фильтрации. Отношение среднеквадратических отклонений (СКО) шумов после отказа и перед ним  $p_k = \sigma_{от,v,k} / \sigma_{v,k}$  определяет степень изменения уровня шумов после отказа. Для нахождения уравнения обнаружителя, полагая  $x_k = 0$ , используется та же методика, что и для режима фильтрации с учетом приведенных выше уравнений. Функция потерь может быть представлена в следующей форме:

$$J_k(\hat{x}_k) = (\sigma_{от,v,k}^2)^{-1} (z_k - h_k \hat{x}_k)^2 + (\sigma_{x,k}^2)^{-1} \hat{x}_k^2, \quad (8)$$

где  $\sigma_{x,k}^2$  – дисперсия входного сигнала  $x_k$ . Исходя из уравнения оптимальности  $\partial J_k(\hat{x}_k) / \partial \hat{x}_k = 0$  формула оценки сигнала имеет вид

$$\hat{x}_k = C_k z_k, \quad C_k = \frac{q_k h_k}{p_k^2 + q_k^2 h_k^2}. \quad (9)$$

Здесь через  $q_k$  обозначено отношение СКО сигнала к СКО шумов  $q_k = \sigma_{x,k} / \sigma_{v,k}$ . До момента отказа величина потерь (8) будет высокой, так как уравнение оценки (9) настроено на нулевой сигнал  $x_k = 0$ . При отказе величина потерь снижается, и это изменение служит источником информации о наличии отказа. Подставляя формулу (9) в (8), получаем выражение для оптимального значения функции потерь:

$$J_{0,k} = D_k z_k^2, \quad D_k = (\sigma_{x,k}^2)^{-1} \left[ (1 - h_k C_k)^2 \frac{q_k^2}{p_k^2} + C_k^2 \right].$$

Отсюда следует, что величина оптимальных потерь пропорциональна  $z_k^2$ . Это дает возможность определять момент отказа по данной переменной. До момента отказа  $z_k^2 = (h_k x_k + v_k)^2$ , а поскольку в совпадающие моменты времени  $x_k$  и  $v_k$  статистически независимы, математическое ожидание до отказа

$$\langle z_k^2 \rangle = h_k^2 \sigma_x^2 + \sigma_{v,k}^2 = d_{1,k}. \quad (10)$$

После отказа  $z_k^2 = v_{от,k}^2$ , поэтому его математическое ожидание

$$\langle z_k^2 \rangle = \sigma_{от,v,k}^2 = d_{2,k}.$$

Разность между  $d_{1,k}$  и  $d_{2,k}$  является средним диапазоном изменения переменной  $z_k^2$ . Если переменная (10) измеряется точно, то момент отказа также определяется точно путем сравнения переменной с порогом  $d_{2,k} < d < d_{1,k}$ . Однако в процессе обнаружения математическое ожидание  $\langle z_k^2 \rangle$  находится приближенно путем усреднения по времени переменной  $z_k^2$ :

$$\langle z_k^2 \rangle \approx \tau^{-1} \sum_{r=0}^{\tau-1} z_{k-r}^2 = y_k(\tau),$$

где  $\tau$  – время усреднения. Такая оценка будет состоятельной лишь для стационарного процесса. При нестационарном она может рассматриваться как эмпирическая. Переменная  $\langle z_k^2 \rangle$  будет случайным процессом, поэтому возникают ошибки в определении момента отказа за счет ложных обнаружений и запаздывания при принятии решения. Уравнение обнаружителя имеет вид

$$\pi_k = \begin{cases} 1, & \text{если } y_k(\tau) \leq d; \\ 0, & \text{если } y_k(\tau) > d, \end{cases}$$

где символ  $\pi_k = 1$  соответствует решению о наличии отказа. Понижения вероятности ложных обнаружений и запаздывания можно добиться путем выбора порога  $d$ . При этом снижение величины порога уменьшает вероятность ложных обнаружений, но увеличивает время запаздывания, и наоборот. В данном случае получить аналитическое выражение для вероятности ложных обнаружений и времени запаздывания от параметров  $d$ ,  $\tau$  невозможно и их приходится определять путем моделирования с использованием метода статистических испытаний.

В практических задачах интерес представляют ситуации, когда вероятность ложных обнаружений мала, что позволяет определять ее в пуассоновском приближении. Известно [8], что в этом случае вероятность пропорциональна среднему числу пересечений процессом  $y_k(\tau)$  порога  $d$ . В качестве критерия целесообразно выбрать среднее число, равное единице, что обеспечивает малую вероятность хотя бы одного ложного обнаружения на интервале наблюдения. В качестве такого интервала можно выбрать среднее время безотказной работы датчика  $t_{от}$ , приведенное в перечне технических характеристик. За счет случайного характера  $y_k(\tau)$  при отсутствии ложных обнаружений момент обнаружения отказа  $t_{об}$  происходит со случайным запаздыванием  $t_{об} - t_{от}$ , среднее время которого обозначается через  $\vartheta$ . Величины  $d$  и  $\vartheta$  находятся путем моделирования по большому числу реализаций  $y_k(\tau)$ , для чего на интервале от  $d_{1,k}$  до  $d_{2,k}$  задается определенное число уровней порога  $d$  и находится среднее число пересечений этих уровней  $\mu(d)$ , а также соответствующие значения  $\vartheta(d)$ . На графике  $\mu(d)$  определяется уровень порога, соответствующего значению  $\mu(d) = 1$ , и значение  $\vartheta$  для этого уровня.

Оценка показателей качества фильтрации производится на трех интервалах:  $0 \leq k < t_{от}$ ,  $t_{от} \leq k < t_{об}$ ,  $k \geq t_{об}$ . Первый интервал соответствует случаю безотказной работы, на втором, со средней длительностью  $\vartheta$ , происходит обнаружение отказа, а на третьем продолжается процесс фильтрации с учетом отключения канала отказавшего датчика.

Критерий (2) определяет величину потерь фильтрации при детерминированном подходе, и синтезированный ФНК будет оптимальным по этому критерию. Представляет интерес оценка показателя качества ФНК по величине дисперсии ошибки фильтрации, где оптимальным является ФК. Сравнение дисперсий ошибок ФК и ФНК дано в работе [9].



### 3. Дисперсии ошибок фильтрации

На первом и третьем интервалах используются оптимальные фильтры, найденные в соответствии с уравнениями (3) – (5). В первом случае уравнение фильтра находится для моделей с учетом  $N$  датчиков, а в третьем – с учетом оставшихся  $N - 1$  датчиков. На втором интервале сохраняется структура и параметры  $K_{0,k}$ ,  $K_{1,k}$  фильтра первого интервала, однако он уже не будет оптимальным, поскольку из-за отказа датчика матрица измерений  $H_k$  изменится и станет равной  $H_{от,k}$  и ковариационная матрица шумов измерений изменится с  $R_k$  на  $R_{от,k}$  за счет изменения дисперсии шумов отказавшего датчика. Из-за этого на втором интервале дисперсия ошибки возрастет. После обнаружения отказа канал отказавшего датчика отключается, при этом матрица измерений остается равной  $H_{от,k}$ , а ковариационная матрица шумов изменится с  $R_{от,k}$  на  $R_{об,k}$ , где дисперсия шумов отказавшего датчика обнуляется. Для этих характеристик определяется структура и параметры фильтра, которые будут оптимальными для изменившихся условий работы. В результате дисперсия ошибки фильтрации уменьшится, однако будет больше по сравнению с первым интервалом, поскольку объем полезной информации снизится.

Более общей является методика оценки дисперсии ошибки на втором интервале, а на первом и третьем интервалах она может рассматриваться как частные случаи.

Вектор ошибки размерности  $m$  на втором интервале имеет вид

$$\mathbf{e}_{от,k} = \mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_{от,k}, \quad (11)$$

где  $\mathbf{x}_k$  определяется уравнением (1), а  $\hat{\mathbf{x}}_{от,k}$  есть оценка на этом интервале, определяемая уравнением

$$\hat{\mathbf{x}}_{от,k} = K_{1,k} A_k \hat{\mathbf{x}}_{от,k-1} + K_{0,k} \mathbf{z}_{от,k}. \quad (12)$$

Здесь коэффициенты усиления фильтра  $K_{1,k}$  и  $K_{0,k}$  остаются теми же, что и на первом интервале, и находятся по формулам (4) и (5), а измерения определяются формулой

$$\mathbf{z}_{от,k} = H_{от,k} \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_{от,k}. \quad (13)$$

Подставляя уравнения (1), (12) и (13) в выражение для ошибки (11) и учитывая, что  $\hat{\mathbf{x}}_{от,k-1} = \mathbf{x}_{k-1} - \mathbf{e}_{от,k-1}$ , получаем уравнение ошибки в виде

$$\mathbf{e}_{от,k} = K_{1,k} A_k \mathbf{e}_{от,k-1} + (I - K_{0,k} H_{от,k} - K_{1,k}) A_k \mathbf{x}_{k-1} + (I - K_{0,k} H_{от,k}) \mathbf{w}_k - K_{0,k} \mathbf{v}_{от,k}.$$

С учетом формул (4) и (5) матрицу  $(I - K_{0,k} H_{от,k})$  можно преобразовать следующим образом:

$$\begin{aligned} (I - K_{0,k} H_{от,k}) &= [Q_k^{-1} + H_k^T R_k^{-1} H_k]^{-1} [Q_k^{-1} + H_k^T R_k^{-1} H_k] \times \\ &\times \left\{ I - [Q_k^{-1} + H_k^T R_k^{-1} H_k]^{-1} H_k^T R_k^{-1} H_{от,k} \right\} = K_{1,k} + K_{0,k} (H_k - H_{от,k}). \end{aligned}$$

В итоге уравнение ошибки

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_{от,k} &= [K_{1,k} + K_{0,k} (H_k - H_{от,k})] A_k \mathbf{e}_{от,k-1} + K_{0,k} (H_k - H_{от,k}) A_k \mathbf{x}_{k-1} + \\ &+ [K_{1,k} + K_{0,k} (H_k - H_{от,k})] \mathbf{w}_k - K_{0,k} \mathbf{v}_{от,k}. \end{aligned} \quad (14)$$

Уравнение (14) зависит от входного сигнала  $\mathbf{x}_{k-1}$ , что делает необходимым совместное решение уравнений (1) и (14), имеющих совместную размерность  $2m$ . Представим эту систему в векторной форме  $\mathbf{r}_{y,k} = [\mathbf{x}_k; \mathbf{e}_{от,k}]^T$ , удовлетворяющей матричному уравнению

$$\mathbf{r}_{от,k} = B_{1,k} \mathbf{r}_{от,k-1} + B_{2,k} \mathbf{w}_k + B_{3,k} \mathbf{v}_{от,k}.$$

Здесь матрицы имеют следующую форму:

$$B_{1,k} = \begin{vmatrix} A_k; & 0 \\ K_{0,k} (H_k - H_{от,k}) A_k; & [K_{1,k} + K_{0,k} (H_k - H_{от,k})] A_k \end{vmatrix}; \quad (15)$$

$$B_{2,k} = \begin{vmatrix} I \\ K_{1,k} + K_{0,k} (H_k - H_{от,k}) \end{vmatrix}; \quad B_{3,k} = \begin{vmatrix} 0 \\ -K_{0,k} \end{vmatrix}.$$

Поскольку в совпадающие моменты времени воздействия  $\mathbf{w}_k$  и  $\mathbf{v}_{от,k}$  статистически независимы, а также не зависят от  $\mathbf{r}_{от,k-1}$  в предыдущий момент времени, при нулевом математическом ожидании вектора  $\langle \mathbf{r}_{от,k} \rangle = 0$  его ковариационная матрица

$$P_{от,k} = \langle \mathbf{r}_{от,k} \mathbf{r}_{от,k}^T \rangle = B_{1,k} P_{от,k-1} B_{1,k}^T + B_{2,k} Q_k B_{2,k}^T + B_{3,k} R_{от,k} B_{3,k}^T. \quad (16)$$

В составе диагональных элементов матрицы (16) находятся  $m$  дисперсий ошибок фильтрации вектора  $\mathbf{x}_k$ .

На первом интервале  $H_{от,k} = H_k$  и матрицы (15) упрощаются, что приводит к независимым уравнениям для входного сигнала  $x_k$  и ошибки фильтрации, которая в этом случае обозначается через  $\mathbf{e}_k = \mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k$ . Уравнение ошибки (14) принимает вид

$$\mathbf{e}_k = K_{1,k} A_k \mathbf{e}_{k-1} + K_{1,k} \mathbf{w}_k - K_{0,k} \mathbf{v}_k. \quad (17)$$

Соответствующее ему уравнение ковариационной матрицы ошибки выглядит следующим образом:

$$P_{e,k} = K_{1,k} A_k P_{e,k-1} A_k^T K_{1,k}^T + K_{1,k} Q_k K_{1,k}^T + K_{0,k} R_k K_{0,k}^T.$$

Данное уравнение автономно и не зависит от уравнения ФНК.

На третьем интервале уравнение ковариационной матрицы ошибки остается таким же, как и (17), за исключением формул для коэффициентов усиления и матрицы шумов измерений. Конечные значения дисперсий на предыдущем интервале являются начальными для последующего.

#### 4. Пример

В качестве входного воздействия рассматривается стационарная случайная последовательность:

$$x_k = a x_{k-1} + w_k, \quad 0 < a < 1,$$

где  $w_k$  – стационарный центрированный белый шум с дисперсией  $\sigma_w^2$ . Измерения  $z_{1,k}$  и  $z_{2,k}$  ( $m=1, N=2$ ) осуществляются посредством двух датчиков с постоянными коэффициентами чувствительности  $h_1, h_2$  и статистически независимыми случайными ошибками  $v_{1,k}$  и  $v_{2,k}$  в виде стационарных центрированных белых шумов с дисперсиями  $\sigma_{v_1}^2$  и  $\sigma_{v_2}^2$ . В процессе работы возможны отказы датчиков со средними временами безотказной работы  $t_{от,1} = t_{от,2}$  соответственно. Ниже рассматривается вариант отказа первого датчика, после чего коэффициент чувствительности  $h_1 = 0$ , а дисперсия шума на его выходе возрастает до значения  $\sigma_{от,v_1}^2$  ( $p = \sigma_{от,v_1} / \sigma_{v_1} > 1$ ). Исследования с использованием методики, изложенной выше, проводились

при следующих значениях параметров:  $a=0,83$  (длительность корреляции равна 5);  $\sigma_{v_1} = \sigma_{v_2} = 1$ ;  $\sigma_{от,v_1} = 2$ ;  $h_1 = 1$ ;  $h_2 = 0,5$ ;  $t_{от,1} = t_{от,2} = 1000$ ; время усреднения  $\tau = 100$ .

На рис. 3, а показана реализация процесса  $z_{1,k}$  на выходе первого датчика с моментом отказа при  $k = 1000$ , а на рис. 3, б – реализация процесса  $y_{1,k}(\tau)$ .

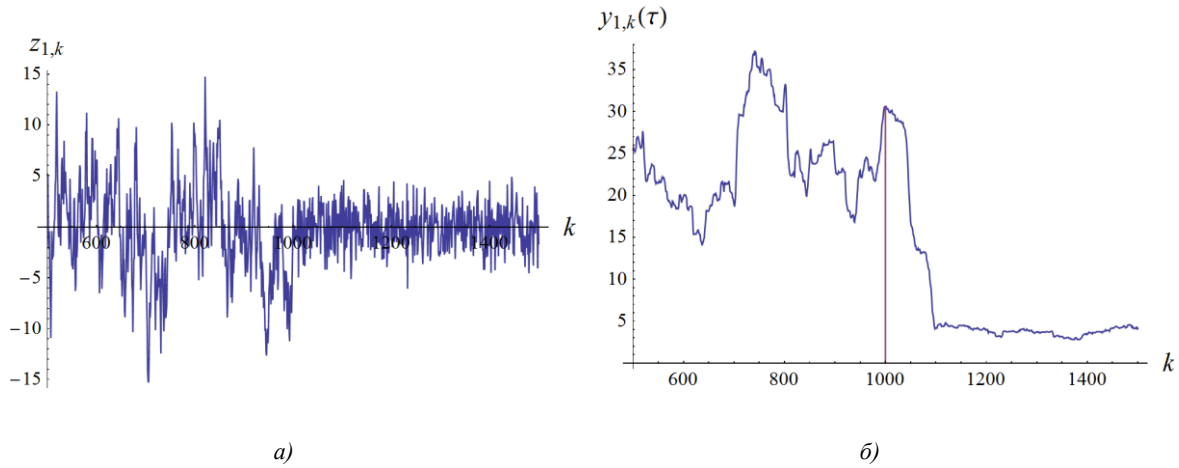


Рис. 3. Выход первого датчика: а) результаты измерений ( $z_{1,k}$ ); б) математическое ожидание квадрата измерений ( $y_{1,k}(\tau)$ )

Уровень порога  $d$  и среднее время запаздывания обнаружения  $\vartheta$  определялись по 100 реализациям процесса  $y_{1,k}(\tau)$ . По графику на рис. 4, а для  $\mu(d)=1$  найден уровень порога  $d=9,5$ , а время запаздывания  $\vartheta=60$ , соответствующее порогу, определялось по зависимости на рис. 4, б.

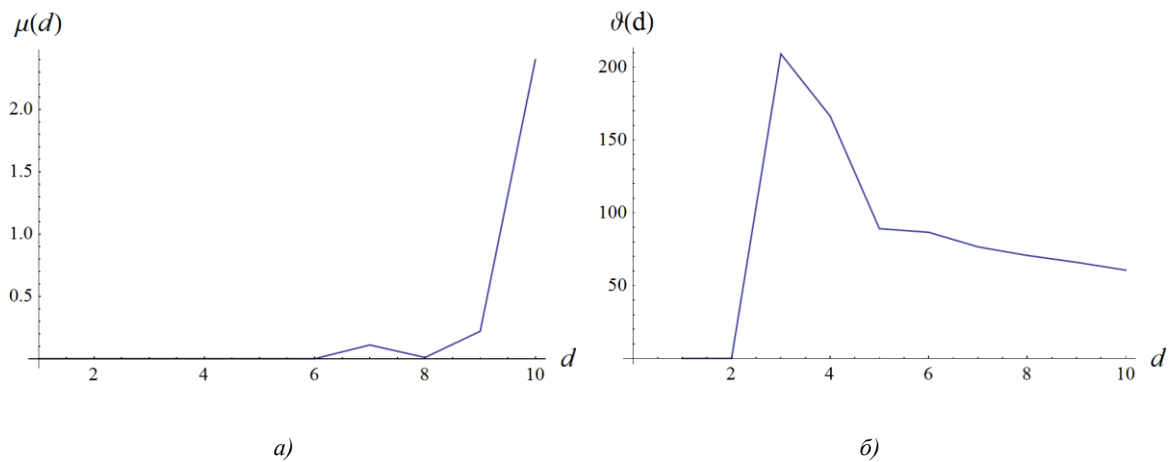


Рис. 4. Зависимости от уровня порога  $d$ : а) среднего числа пересечений  $\mu(d)$ ; б) среднего времени запаздывания обнаружения  $\vartheta(d)$

Зависимость  $\vartheta(d)$  на участке  $0 < d \leq 3$  определяется шумами и для решения задачи не представляет интереса.

С использованием уравнений (15) – (17) получен график изменения дисперсии ошибки фильтрации  $\sigma_{e,k}^2$  на трех интервалах фильтрации (рис. 5).

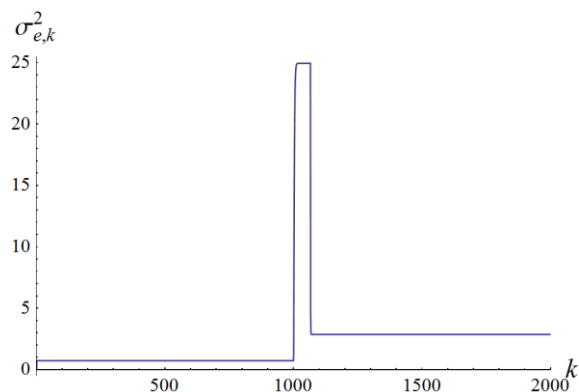


Рис. 5. Дисперсия ошибки фильтрации  $\sigma_{e,k}^2$  при отказе первого датчика

Полученные результаты показывают, что работоспособность фильтра при отказе первого датчика сохраняется, однако дисперсия ошибки фильтрации после обнаружения отказа возрастает. На интервале среднего времени задержки обнаружения  $\Theta$  дисперсия ошибки максимальна. Поскольку данный интервал мал по сравнению со средним временем безотказной работы, такое увеличение дисперсии практически не влияет на показатели качества фильтрации.

### Заключение

Работоспособность фильтра при отказе датчика может быть достигнута путем резервирования. При этом требуется выполнение операции обнаружения момента отказа, отключения канала отказавшего датчика и изменения алгоритма фильтрации с учетом смены условий функционирования. При статистическом подходе алгоритмы выполнения данной процедуры оказываются весьма сложными и требуют больших вычислительных затрат при реализации в реальном масштабе времени. Сокращение возможно путем перехода от статистического подхода к детерминированному для синтеза фильтров на основе рекуррентного метода наименьших квадратов. В статье рассмотрена методика такого синтеза, и на ее основе получены уравнения фильтра и обнаружителя отказов. Структура этих уравнений получается достаточно простой для реализации и позволяет сохранять работоспособность фильтра при отказах датчиков. На конкретном примере продемонстрирована технология использования предложенной методики. Помимо резервирования возможно обеспечение отказоустойчивости алгоритмическим путем, что является предметом дальнейших исследований.

### Список литературы

1. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения : ГОСТ 27.002–89. – Введ. 01.07.90. – Минск : Гос. комитет по стандартизации Республики Беларусь : Ин-т машиноведения АН СССР, 1990. – 36 с.
2. Willsky, A.S. A survey of design methods for failure detection in dynamic systems / A.S. Willsky // Automatica. – 1976. – Vol. 92. – P. 601–611.
3. Гришкин, Ю.П. Обнаружение нарушений в динамических системах / Ю.П. Гришкин // Зарубежная радиоэлектроника. – 1981. – № 5. – С. 42–53.
4. Артемьев, В.М. Теория динамических систем со случайными изменениями структуры / В.М. Артемьев. – Минск : Высшая школа, 1979. – 160 с.
5. Казаков, И.Е. Анализ систем случайной структуры / И.Е. Казаков, В.М. Артемьев, В.А. Бухалев. – М. : Наука, 1993. – 270 с.
6. Степанов, А.О. Введение в теорию оценивания / А.О. Степанов. – СПб. : ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2009. – 496 с.

7. Эльясберг, П.Е. Определение движения по результатам измерений / П.Е. Эльясберг. – М. : Наука, 1976. – 416 с.
8. Тихонов, В.И. Выбросы случайных процессов / В.И. Тихонов. – М. : Наука, 1970. – 392 с.
9. Артемьев, В.М. Рекуррентная линейная фильтрация случайных последовательностей методом наименьших квадратов с регуляризацией решения / В.М. Артемьев, А.О. Наумов, Л.Л. Кохан // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2017. – № 1. – С. 95–101.

**Поступила 29.05.2017**

*Институт прикладной физики  
НАН Беларуси,  
Минск, ул. Академическая, 16  
e-mail: naumov@iap.bas-net.by*

**V.M. Artemiev, A.O. Naumov, L.L. Kokhan**

**SIGNAL FILTERING FOR SUDDEN SENSOR FAILURES BASED  
ON RECURRENT LEAST SQUARES METHOD**

Synthesis technique for fault-tolerant filters with redundant sensors based on recurrent least squares method (deterministic approach) is proposed. It allows to design simple filtering algorithms with failure detection and to realize filter structure reorganization providing filter functionality.

УДК 004.822:514

**В.А. Житко, Б.М. Лобанов**

## **ПРИКЛАДНЫЕ СИСТЕМЫ С РЕЧЕВЫМ ИНТЕРФЕЙСОМ**

*Рассматриваются три прикладные системы с речевым интерфейсом. Первые две из них предоставляют конечному пользователю возможность устно задавать вопрос и слышать ответ, создавая тем самым дополнение к традиционному вводу-выводу через клавиатуру и экран компьютера. Третья система (IntonTrainer) предоставляет пользователю возможность интерактивного голосового взаимодействия и предназначена для углубленного самообучения интонации устной речи.*

### **Введение**

Современный уровень развития вычислительной техники и ее повсеместное внедрение в человекомашинные системы управления делают актуальной организацию общения человека и компьютера в одной из наиболее удобных для человека форм – в форме речевого диалога на естественном языке. Принципиальными преимуществами использования речевого интерфейса в человекомашинных системах являются:

– удобство, естественность и простота общения, не требующие специальной подготовки, что существенно расширяет круг потенциальных пользователей вычислительных систем и повышает эффективность их применения;

– разгрузка зрительного канала при выводе информации и устранение ручных манипуляций при вводе, что увеличивает оперативность взаимодействия с компьютером и уменьшает число ошибок оператора;

– возможность использования в качестве терминалов телефонных аппаратов и существующей сети телефонной связи, что позволяет создавать системы массового обслуживания, в том числе с выходом в Интернет.

Создание речевого интерфейса (РИ) для широкого спектра прикладных человекомашинных систем наталкивается на значительные трудности, связанные с разработкой наукоемкого программного обеспечения (ПО) высокой сложности. Разработанные к настоящему времени речевые технологии достигли высокого уровня развития, что позволяет использовать различные готовые технические решения как компоненты при проектировании ПО разнообразных прикладных человекомашинных систем с речевым интерфейсом.

### **1. Компонентный подход при проектировании естественно-языкового интерфейса**

В связи с динамичным развитием рынка ПО большое внимание уделяется вопросам снижения сроков и стоимости его разработки. Это достигается целым комплексом мер, включающим в себя как технические решения, так и административные. Одним из элементов этого комплекса мер является использование готовых компонентов в разработке ПО. Такой подход называется компонентно-ориентированным программированием (англ. component-oriented programming, COP).

Программные компоненты – это повторно используемые части программных систем, предназначенные для достижения четких целей [1]. Компоненты могут применяться в различных системах, условиях и общих процессах, что накладывает на них повышенные требования как со стороны реализации, так и со стороны проектирования. Для компонентов важной является корректность выбора их функционала, а объем функциональных возможностей должен быть достаточным для выполнения независимой задачи и не превышать объем, затрудняющий разворачивание компонента в целевой системе.

Применение компонентов при проектировании и разработке программных продуктов позволяет повысить качество, ускорить разработку и сократить время до выхода на рынок данного программного продукта [2]. СОР предоставляет эффективный механизм управления структурой программных систем с возрастающей сложностью (управление сложностью), где важным элементом является функция управления не только структурой системы, но и каждым компонентом в отдельности, возможность адаптации компонентов к изменяющимся требованиям (управление изменениями). При этом созданный компонент можно использовать повторно в различных системах без необходимости его дополнительной адаптации [3, 4].

Ниже рассмотрены примеры разработки прикладных компьютерных программ с речевым интерфейсом (приложений) при использовании компонентного подхода к их проектированию. Приложения реализованы под операционные системы Windows (7, 8, 10) и Linux (Debian, Ubuntu).

## 2. Приложение с элементами речевого диалога

Целью разработки данного программного приложения с элементами речевого диалога является предоставление рядовым пользователям (в том числе детям дошкольного и школьного возраста) возможности ознакомления в игровой форме с современным речевым интерфейсом, включающим автоматическое распознавание и синтез речи. В рамках приложения разработан программный комплекс, объединивший в себе режимы работы, которые демонстрируют различные аспекты использования речевого интерфейса: режим «Попугай» – повтор синтезированным голосом любых сказанных пользователем фраз; «Сказка» – простейший диалог с пользователем (например, детская сказка про белого бычка); «Переводчик» – устно-речевой перевод для английского, белорусского и русского языков; «Калькулятор» – возможность производить арифметические действия, задаваемые голосовыми командами.

В рассматриваемой системе использованы:

- собственные разработки авторов, к которым относятся компоненты записи и детектирования речи, работы с синтезаторами белорусской и русской речи [5, 6], графический пользовательский интерфейс и логические компоненты работы системы;
- сторонние разработки, находящиеся в свободном доступе в Интернете, а именно компоненты работы с Google Voice [7] и Google Translate [8].

Общая структурная схема системы, реализующей названные виды режимов работы, изображена на рис. 1.

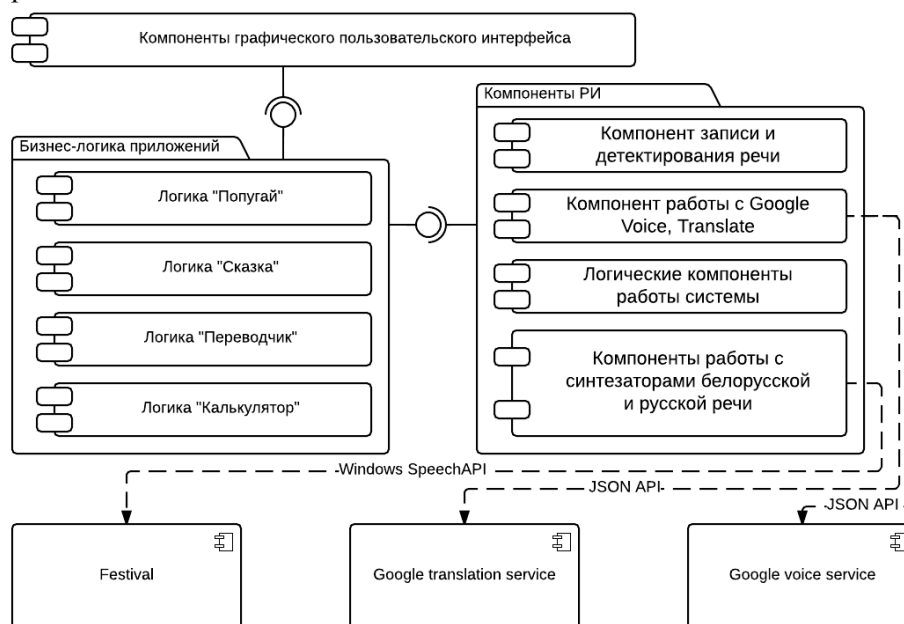


Рис. 1. Структурная схема игрового приложения

Алгоритм работы приложения, который описывает обработку произносимого сигнала и логику взаимодействия с компонентами распознавания речи, представлен на рис. 2.

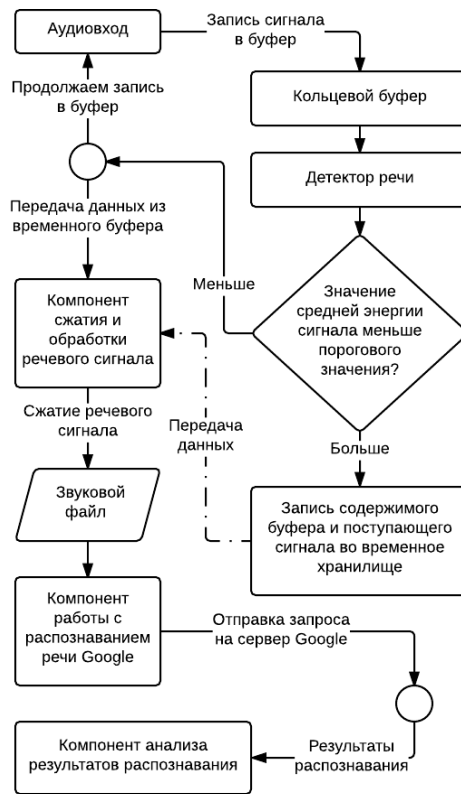


Рис. 2. Алгоритм работы игрового приложения

Главное окно пользовательского интерфейса приложения (рис. 3) позволяет выбрать один из режимов работы.

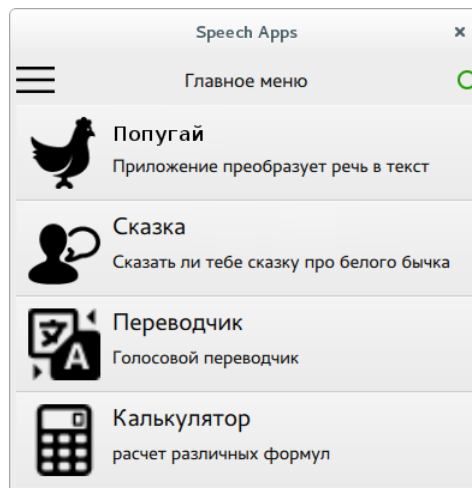


Рис. 3. Главное окно игрового приложения

В режиме «Попугай» (рис. 4) система повторяет синтезированным голосом любые сказанные пользователем фразы. При этом происходит их автоматическое распознавание, преобразование в текст и синтез речи по распознанному тексту. В этом режиме пользователь имеет возможность



произносить произвольные фразы и прослушивать результат распознавания синтезированным голосом, усваивая таким образом специфику работы с речевым интерфейсом системы.

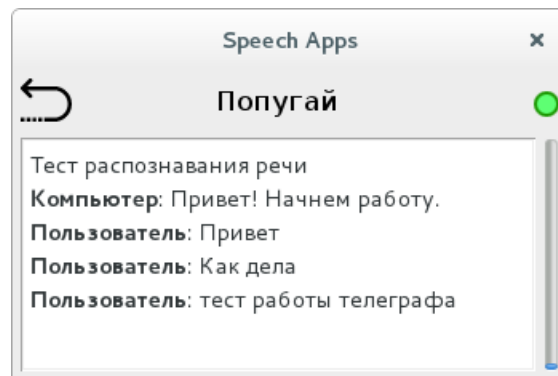


Рис. 4. Пример работы игрового приложения в режиме «Попугай»

В режиме «Сказка» (рис. 5) демонстрируется элементарный диалог в стиле докучной сказки про белого бычка, рассказываемой с большим успехом родителями детям дошкольного возраста.

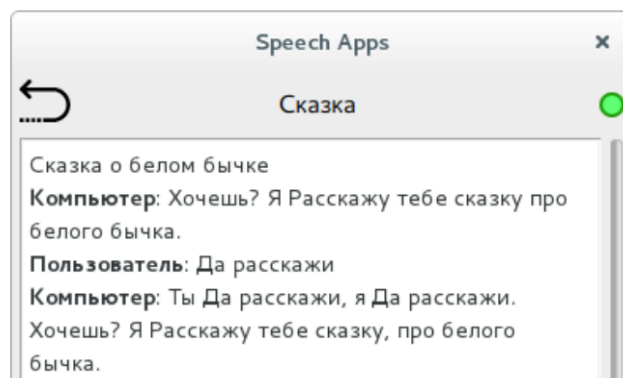


Рис. 5. Пример работы игрового приложения в режиме «Сказка»

Пример текста диалога, озвучиваемого синтезатором, где показаны распознанные компьютером реплики пользователя, приводится ниже.

Компьютер: Хочешь? Я расскажу тебе сказку про белого бычка.

Человек: *Да*.

Компьютер: Ты *Да*, я *Да*. Хочешь? Я расскажу тебе сказку про белого бычка.

Человек: *Расскажи*.

Компьютер: Ты *Расскажи*, я *Расскажи*. Хочешь? Я расскажу тебе сказку про белого бычка.

Человек: *Не хочу сказку*.

Компьютер: Ты *Не хочу сказку*, я *Не хочу сказку*. Хочешь? Я расскажу тебе сказку про белого бычка.

Человек: *Дурак*.

Компьютер: Ты *Дурак*, я *Дурак*. Хочешь? Я расскажу тебе сказку про белого бычка.

Человек: *Замолчи наконец*.

Компьютер: Ты *Замолчи наконец*, я *Замолчи наконец*. Хочешь? Я расскажу тебе сказку про белого бычка.

В режиме «Переводчик» (рис. 6) осуществляется распознавание речи на английском или русском языке, преобразование речи в текст, перевод распознанного текста на английский, белорусский или русский язык. Полученный текст отправляется в соответствии с указанным пользователем языком на вход одного из синтезаторов речи.

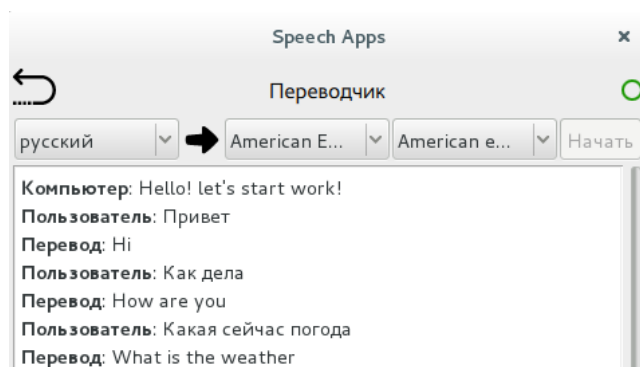


Рис. 6. Пример работы игрового приложения в режиме «Переводчик»

В режиме «Калькулятор» (рис. 7) пользователь может осуществлять арифметические действия, задаваемые голосовыми командами. Вывод результата осуществляется голосом в виде синтезированной речи.

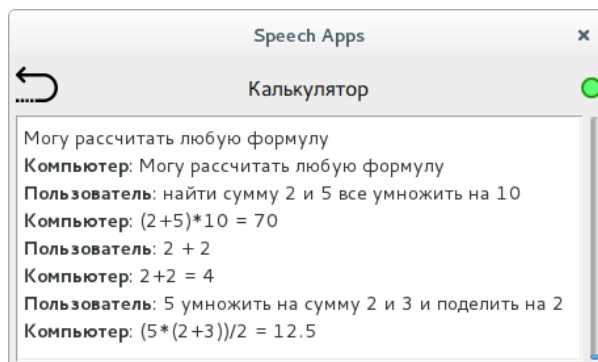


Рис. 7. Пример работы игрового приложения в режиме «Калькулятор»

Более подробные сведения об особенностях программной реализации данного игрового приложения изложены в работе [9].

### 3. Справочная система по правилам дорожного движения

Для недостаточно опытного водителя было бы очень полезным получить оперативную справку по правилам дорожного движения (ПДД) и выбору конкретного действия в возникшей ситуации без необходимости остановки для просмотра справочного пособия. Решение такой проблемы становится возможным с помощью справочной системы (ПДД-приложения), в которой для водителя реализована возможность голосового запроса, его анализа и получения голосового ответа, рекомендующего его дальнейшие действия в соответствии с ПДД.

В качестве предметной области для системы были выбраны реальные ПДД, действующие на территории Республики Беларусь. Отметим, что набор ПДД характеризуется структурированностью исходных данных, что существенно облегчает решение поставленной задачи. В процессе взаимодействия с пользователем данная система в качестве речевого ответа производит выбор текста наиболее релевантного ПДД и, если необходимо, задает уточняющие вопросы, снимающие возможную неоднозначность запроса.

База ПДД представлена в виде набора отдельных правил с указанием дополнительных ключевых слов для конкретного правила. Существует также список всех ключевых слов предметной области. Цикл работы справочной системы начинается с ввода пользователем голосового запроса, который преобразуется в текст на естественном языке. По введенному в систему тексту строится его формальное описание в памяти системы. Все предшествующие результаты применяются при анализе последующих запросов, что позволяет системе сохранять ход диалога с пользователем и задавать уточняющие вопросы.

В описываемой системе использованы:

- собственные разработки авторов, к которым относятся компоненты записи и детектирования речи, компоненты работы с синтезаторами белорусской и русской речи [5, 6], разбора и анализа текста, графического пользовательского интерфейса; логические компоненты работы системы; база знаний ПДД; компонент принятых решений;

- сторонняя разработка – хорошо зарекомендовавшая себя система распознавания русской речи CMU Sphinx [10], находящаяся в свободном доступе в Интернете.

На рис. 8 представлена общая структурная схема ПДД-приложения, реализующего работу справочной системы с РИ.

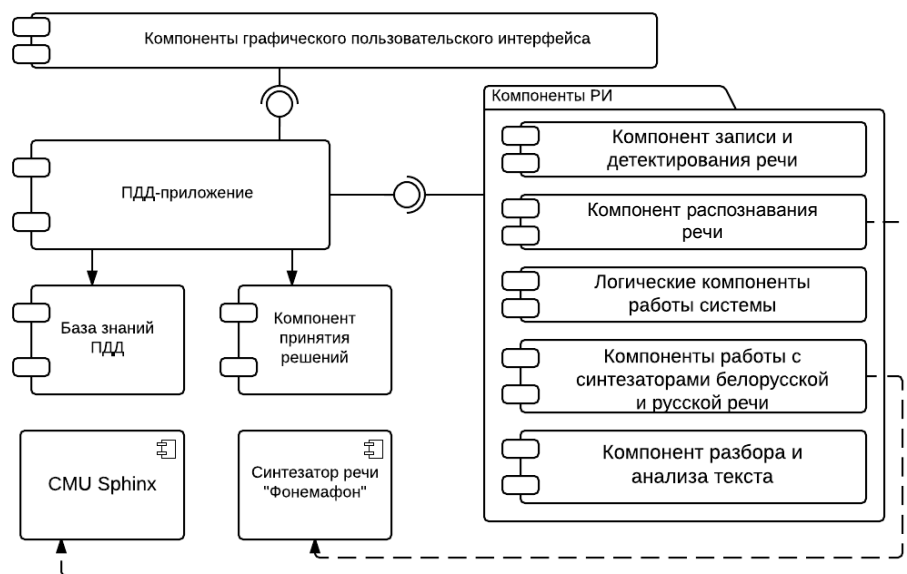


Рис. 8. Общая структурная схема ПДД-приложения

Более подробные сведения об особенностях программной реализации данного игрового приложения изложены в работе [11].

#### 4. Многоязычная система обучения интонации речи IntonTrainer

Интонация играет важную роль в восприятии речи человеком. Зачастую в зависимости от интонационного оформления логически идентичные высказывания могут иметь различное семантическое значение. Интонация представляет собой важнейшее средство передачи как собственно языковой, так и социокультурной информации. В практике преподавания существует мнение, что иноязычный акцент особенно ярко проявляется в интонации, поэтому при обучении и преподавании иностранных языков ей следует уделять особое внимание. Следует иметь в виду, что функции интонации в речи очень многообразны и нарушения в этой области могут привести к серьезным смысловым изменениям, а также создать неверное впечатление о говорящем человеке. Очень часто учащимся сложно контролировать адекватность своей интонации (особенно при отсутствии музыкального слуха). Существующие лингафонные курсы и оборудование обеспечивают только слуховую обратную связь контроля правильности интонирования речи, что явно недостаточно.

В мировой практике имеется устойчивая тенденция к освоению языка с помощью компьютера (Computer Assisted Language Learning, CALL). CALL является широко распространенной междисциплинарной областью, которая включает также подобласть обучения произношению на иностранных языках с использованием речевых технологий.

Описываемая в настоящей работе система IntonTrainer (рис. 9) предназначена для углубленного обучения интонации устной речи. Обучение основано на сравнении эталонных интонационных портретов заданного набора фраз с интонацией фраз, произносимых учащимися.

Акустическая база данных включает набор стандартных фраз, который достаточно полно покрывает многообразие интонационных эталонов и их основных вариаций, используемых в изучаемом языке. Система основана на интерактивном взаимодействии с обучаемой личностью, обеспечивая слуховую и зрительную обратную связь, а также численную оценку правильности интонирования фразы. В настоящее время система ориентирована на обучение интонации устной речи на русском или английском языках. Настройка на другие языки может быть достаточно просто осуществлена путем создания соответствующих акустических баз данных.

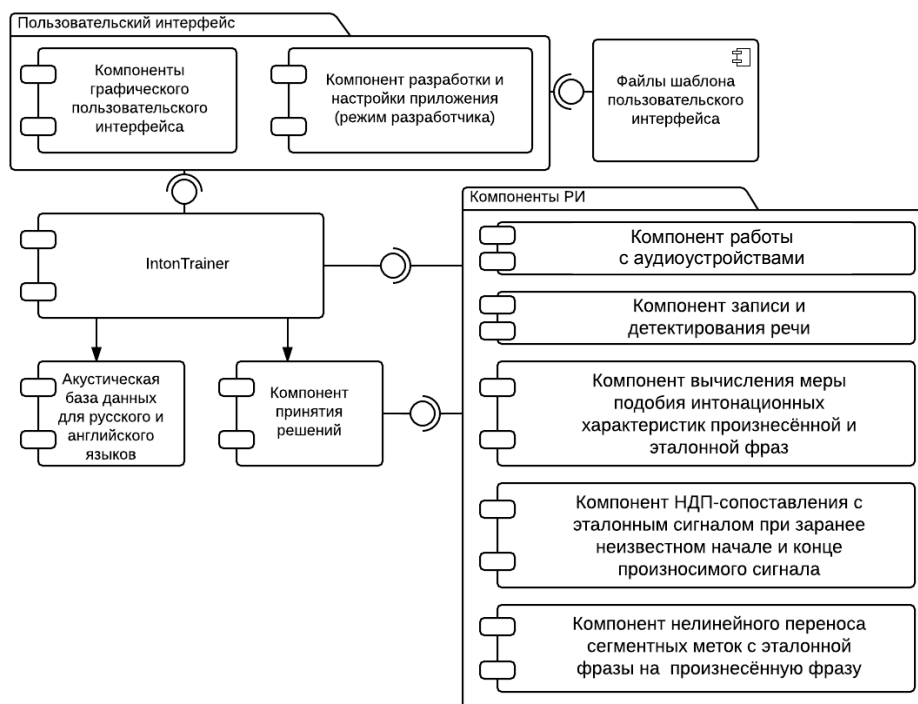


Рис. 9. Структурная схема приложения IntonTrainer

В системе IntonTrainer использованы:

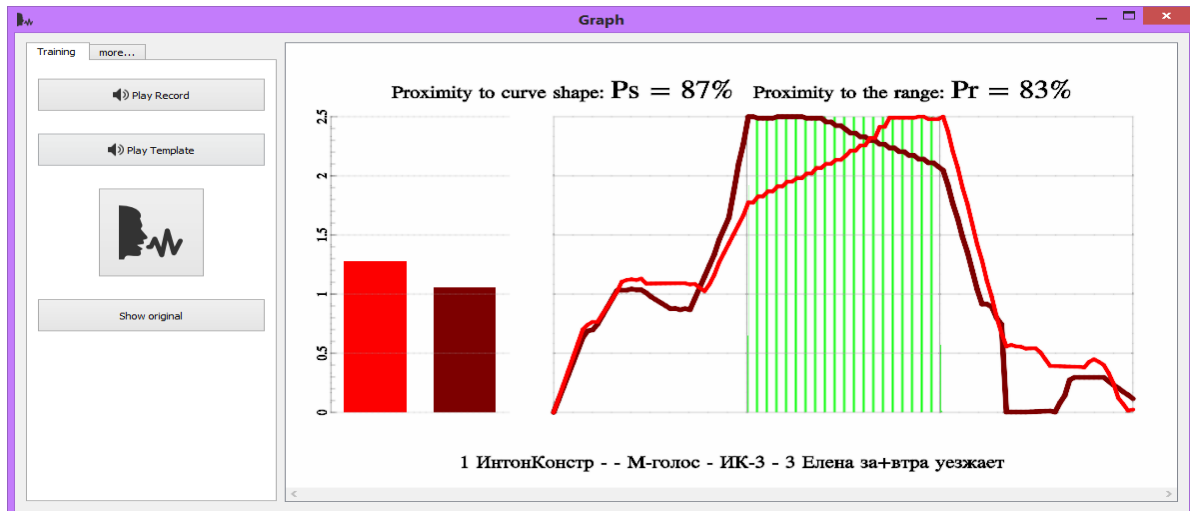
– собственные разработки авторов, к которым относятся компоненты работы с аудиоустройствами, записи и детектирования речи, непрерывного ДП-сопоставления (алгоритмы динамического программирования) с эталонным сигналом при заранее неизвестных начале и конце произносимого сигнала [12], нелинейного переноса сегментных меток с эталонной фразы на произнесенную фразу [6], вычисления меры подобия интонационных характеристик произнесенной и эталонной фраз [13], графического пользовательского интерфейса; логические компоненты работы системы; акустическая база данных для русского и английского языков и компонент принятия решений;

– сторонняя разработка – хорошо зарекомендовавший себя программный комплекс анализа и обработки речевых сигналов, который находится в свободном доступе в Интернете [14].

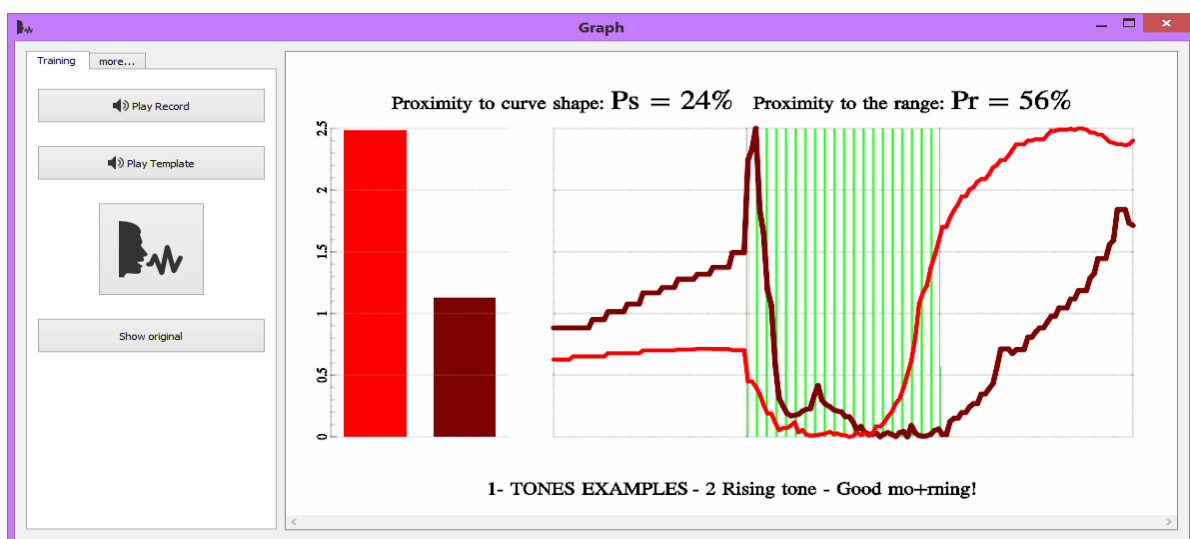
Прототип приложения написан под операционные системы Windows (7, 8, 10) и Linux (Debian, Ubuntu). В работе приложения используются библиотека Qt для реализации отладочного пользовательского интерфейса и ядра приложения и библиотека MathGL для вывода графиков. Для реализации основного пользовательского интерфейса применяется приложение, написанное на HTML/JS (используется ReactJS-фреймворк). Алгоритмы расчета и обработки данных написаны на C с использованием библиотек GNU Scientific Library, Speech Signal Processing Toolkit (SPTK) и OpenAL.

В процессе обучения пользователь оценивает степень правильности интонирования фразы визуально в виде графиков изменения частоты основного тона и в виде столбчатой диаграммы диапазонов изменения данной частоты эталонной и произнесенной фраз, а также в виде численных оценок степени совпадения ее кривых ( $P_s$ ) и диапазонов их измене-

ния (Pr). При правильном интонировании фразы пользователь видит высокие оценки Ps/Pr и схожие графики универсального мелодического портрета (УМП) (рис. 10, а). В случае ошибочного интонирования фразы пользователь может увидеть, в каком месте фразы он допустил ошибку по расхождению графиков УМП (рис. 10, б).



а)



б)

Рис. 10. Рабочее окно приложения IntonTrainer: а) на русском языке; б) на английском языке

Более подробные сведения об особенностях программной реализации данного приложения изложены в [15]. Для читателей доступны также две демоверсии системы IntonTrainer, ориентированные на изучение интонаций русского и английского языков (<https://intontrainer.by/>).

## Заключение

Рассмотренные первые два примера прикладных систем с речевым интерфейсом предоставляют конечному пользователю возможность устно задавать вопрос и слышать ответ от системы, создавая дополнение к традиционному вводу-выводу через клавиатуру и экран компьютера, что делает интерфейс более естественным и дружелюбным для пользователя.

Система интонационного тренинга IntonTrainer сможет найти применение не только при обучении интонации иностранной речи, но и в практике обучения нормативной интонации дикторов радио и телевидения, операторов колл-центров, а также людей других профессий, где требуется идеальное владение устной речью.

Представленный набор спроектированных и реализованных компонентов речевого интерфейса со строго заданным функционалом позволяет упростить разработку других подобных систем с речевым интерфейсом, а в дальнейшем упрощает их сопровождение и отладку.

Разбиение системы на отдельные независимые компоненты дает возможность интеграции речевого интерфейса в различные сторонние разработки и проекты, а также интеграции различных подходов и методов в рамках одного проекта, эффективно используя их лучшие стороны.

### Список литературы

1. Szyperski, C. Component Software: Beyond Object-Oriented Programming / C. Szyperski. – N. Y. : Addison-Wesley, 1998. – 411 p.
2. Cheesman, J. UML Components: A Simple Process for Specifying Component-Based Software / J. Cheesman, J. Daniels. – Boston : Addison-Wesley, 2000. – 208 p.
3. Wang, A. Ju. An Component-Oriented Programming / A. Ju. Wang, K. Qian. – 1st ed. – N. Y. : Addison-Wesley, 2005. – 336 p.
4. Brown, A.W. The current state of CBSE / A.W. Brown, K.C. Wallnau // IEEE Software, sept. 1998. – Los Alamitos, CA, USA, 1998. – Vol. 15, iss. 5. – P. 37–46.
5. Гецевич, Ю.С. Система синтеза белорусской речи по тексту / Ю.С. Гецевич, Б.М. Лобанов // Речевые технологии. – 2010. – № 1. – С. 91–100.
6. Лобанов, Б.М. Компьютерный синтез и клонирование речи / Б.М. Лобанов, Л.И. Цирульник. – Минск : Бел. наука, 2008. – 344 с.
7. Google Cloud Speech API [Electronic resource]. – 2016. – Mode of access : <https://cloud.google.com/speech/docs>. – Date of access : 20.05.2017.
8. Google Cloud Translation API [Electronic resource]. – 2016. – Mode of access : <https://cloud.google.com/translate/docs>. – Date of access : 20.05.2017.
9. Житко, В.А. Микросервисный подход к проектированию речевых интерфейсов / В.А. Житко, Б.М. Лобанов // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS–2016) : мат. VI Междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 18–20 февр. 2016 г.); под ред. В.В. Голенкова. – Минск : БГУИР, 2016. – С. 383–388.
10. CMU Sphinx Speech Recognition Toolkit [Electronic resource]. – 2016. – Mode of access : <https://sourceforge.net/projects/cmuspinx>. – Date of access : 20.05.2017.
11. Житко, В.А. Справочная система с речевым интерфейсом / В.А. Житко, Ю.С. Гецевич, Б.М. Лобанов // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS–2013) : мат. III Междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 21–23 февр. 2013 г.) / редкол. : В.В. Голенков (отв. ред.) [и др.]. – Минск : БГУИР, 2013. – С. 505–510.
12. Lobanov, B.M. Automatic Recognition of Sounds Combination in Running Speech Signal / B.M. Lobanov, G.S. Slucker, A.P. Tizik // Автоматическое распознавание и синтез речи : сб. науч. тр. – Минск : Ин-т техн. кибернетики НАН Беларуси, 2000. – С. 78–88.
13. Lobanov, B.M. Comparison of Melodic Portraits of English and Russian Dialogic Phrases / B.M. Lobanov // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии : по мат. ежегодной Междунар. конф. «Диалог» (Москва, 1–4 июня 2016 г.). – М. : РГГУ, 2016. – Вып. 15(22). – С. 382–392.
14. Speech Signal Processing Toolkit (SPTK) [Electronic resource]. – 2016. – Mode of access : <https://sourceforge.net/projects/sp-tk>. – Date of access : 20.05.2017.

---

15. Lobanov, B.M. A prototype of the computer system for speech intonation training / B.M. Lobanov, V.A. Zhitko // Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2017) : мат. VI Междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 18–20 февр. 2017 г.) ; под ред. В.В. Голенкова. – Минск : БГУИР, 2017. – С. 383–388.

Поступила 21.06.2017

*Объединенный институт проблем  
информатики НАН Беларуси,  
Минск, Сурганова, 6  
e-mail: lobanov@newman.bas-net.by,  
zhitko.vladimir@gmail.com*

**V.A. Zhitko, B.M. Lobanov**

### **SOME EXAMPLES OF APPLIED SYSTEMS WITH SPEECH INTERFACE**

Three examples of applied systems with a speech interface are considered in the article. The first two of these provide the end user with the opportunity to ask verbally the question and to hear the response from the system, creating an addition to the traditional I / O via the keyboard and computer screen. The third example, the «IntonTrainer» system, provides the user with the possibility of voice interaction and is designed for in-depth self-learning of the intonation of oral speech.

УДК 004.925.83

Д.М. Васильков

## ОЦЕНКА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ СКАНИРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ СЕНСОРА MICROSOFT KINECT

*Предлагается технология оценки формы и размеров тела человека с помощью сенсора Microsoft Kinect. Данное устройство включает видеокамеру и глубинный сенсор, что позволяет для каждого пиксела изображения получить расстояние от объекта до фокуса камеры. Результатом сканирования является триангуляционная поверхность высокой плотности, содержащая множество шумов, которые проявляются в виде осцилляций, изолированных участков и дыр. При сканировании человека дополнительный шум создают складки и неровности одежды. Описана технология создания разреженной и регулярной триангуляционной 3D-модели тела человека (аватара) без указанных погрешностей, которая имеет параметры формы, осанки и основных метрик, близкие к параметрам сканируемого тела. Задача находит применение при индивидуальном пошиве одежды, а также в сфере компьютерных игр.*

### Введение

Технологии 3D-сканирования приобрели в последние годы широкую популярность в промышленности, сфере развлечений и в быту, где они находят множество новых применений – от моделирования объектов виртуальной и дополненной реальности до клонирования заготовок и деталей с помощью 3D-принтера. В данной работе рассматривается так называемая виртуальная примерочная, в которой клиент магазина одежды сканируется с помощью простого и недорогого устройства. Затем с помощью специального мобильного сервиса полученная 3D-модель тела может быть загружена клиентом на планшет или смартфон для выбора и виртуальной «примерки» предлагаемого магазином экземпляра одежды. Понятно, что дешевизна и доступность устройств, используемых при сканировании, играют ключевую роль для их массового применения. Между тем, как показывает практика, 3D-модели, полученные с помощью недорогих технологий, обладают рядом недостатков, не позволяющих полностью автоматизировать процесс виртуальной примерки.

Фактически задача сводится к снятию мерок – основных геометрических параметров тела, таких как рост, длина и обхват конечностей, ширина плеч, обхваты туловища и т. д.

Непосредственно на процесс снятия мерок накладывается ряд ограничений:

1. Необходимо минимизировать или полностью исключить механический контакт оператора со сканируемым человеком.

2. При оценке размеров и формы тела необходимо минимизировать ручные операции, включая действия по корректировке и анализу полученной модели в 3D-редакторе.

3. В процессе снятия мерок клиент должен снять только объемную верхнюю одежду (пальто, куртку, пиджак). Клиент может сканироваться в легкой одежде, допускающей складки и неровности.

Существует ряд исследований и программных продуктов, в которых данные ограничения в той или иной комбинации отсутствуют или вообще не рассматриваются [1–5]. Новизна метода, предлагаемого в настоящей работе, состоит в обеспечении высокой точности мерок с учетом ограничения 3, представляющего собой серьезное препятствие для полной автоматизации процесса. Еще одним результатом является алгоритм точного разграничения частей тела в исходной отсканированной модели, имеющей в области конечностей так называемые мембраны, затрудняющие определение точных границ.

Важно также учитывать, что такие элементы 3D-модели тела, как лицо, волосы, пальцы рук и ног, должны быть выполнены с высокой детализацией, а сама модель должна допускать анимацию (например, для виртуальной демонстрации моделей одежды [6]). В разд. 3 будет показано, что для подобных целей модель, полученная в результате сканирования, не годится



в силу многочисленных шумовых артефактов. Вместо нее необходимо использовать искусственную модель (аватар), созданную заранее в 3D-редакторе и трансформированную затем в модель с геометрическими параметрами, полученными в результате сканирования и постобработки. Ниже будет описан процесс трансформации аватара с помощью библиотеки скелетной анимации.

### 1. 3D-сканер

3D-сканеры отличаются технологией сканирования, габаритами, функциональными характеристиками и ценой, которая колеблется от пары сотен до нескольких тысяч долларов [7]. В данном исследовании использован сенсорный контроллер Microsoft Kinect v.2 (рис. 1). Это недорогое устройство, выпускаемое компанией Microsoft в основном для игр и развлечений, конструктивно состоит из обычной RGB-камеры, интегрированной с инфракрасными излучателем и приемником, которые вместе образуют сенсор глубины.

Характеристикой производительности сенсора является кадровая частота, измеряемая в FPS (Frames Per Second). Библиотека Microsoft Kinect SDK, входящая в комплект поставки, предоставляет доступ к данным каждого кадра в виде двух матриц: матрицы изображения, полученной с помощью RGB-камеры, и матрицы глубины, каждый пиксел которой содержит расстояние до соответствующего объекта сцены. Матрицы имеют разное разрешение, поэтому SDK предоставляет специальную функцию для вычисления соответствия пикселей между обеими матрицами. Кроме того, используя параметры внутренней калибровки камеры, можно вычислить пространственные координаты точки, соответствующей данному пикселу.



Рис. 1. Контроллер Microsoft Kinect v.2

Кроме описанных низкоуровневых функций, SDK предоставляет мощный вычислительный функционал высокого уровня, позволяющий выделить на изображении контур и скелет человека, распознать жесты и мимику, а также выполнить пространственное сканирование, получив на выходе 3D-модель небольшого объекта или целого помещения.

Алгоритм пространственного сканирования, называемый Kinect Fusion, имеет ряд реализаций и модификаций [8, 9]. В упрощенном виде его идея состоит в эффективном поиске аффинного преобразования, совмещающего облака точек, полученные при разных положениях камеры. Для работы алгоритма в реальном времени требуется компьютер с мощным графическим процессором, допускающий параллельные вычисления.

Результатом сканирования является облако точек, плотность которого зависит от параметров алгоритма и составляет в среднем несколько десятков точек на  $\text{см}^3$ . На основе этого облака точек Kinect SDK позволяет построить триангуляционную поверхность, аппроксимирующую сканируемый объект.

Помимо Microsoft Kinect, для экспериментов использовался также сканер Intel RealSense R200 [10], находящийся примерно в той же ценовой категории, но обладающий рядом достоинств, особенно в плане качества пространственного сканирования. Однако ни один сканер, включая самые мощные и дорогие, не обеспечивает полную автоматизацию процесса снятия мерок с учетом описанных ограничений.

### 2. Сканирование и постобработка

Сканирование производится следующим образом. Человек стоит на вращающейся платформе в позе «А» (руки разведены под углом примерно  $45^\circ$ ), напротив которой установлен 3D-сканер. Для сканирования всей площади тела достаточно одного-двух оборотов, что занимает около минуты. Результатом сканирования и обработки с помощью процедуры Kinect Fusion является облако точек, которое затем преобразуется в триангуляционную поверхность (рис. 2, а).

Для стабильной работы алгоритма сканирования важно правильно настроить и контролировать такие параметры, как расстояние от сенсора до сканируемой поверхности в данный момент времени, скорость движения платформы, сканируемый объем и т. д.

Полученная модель тела человека представляет собой аморфную неструктурированную поверхность с множеством шумовых артефактов, вызванных спецификой алгоритма (рис. 2, б). После их устранения полученная поверхность может содержать от  $10^4$  до  $10^6$  треугольников (фактическое количество определяется расстоянием от сенсора до платформы и сканируемой площадью). Принимая в расчет низкое качество этой черновой модели, становится очевидным, что она не может напрямую использоваться для оценки формы и размеров тела, не говоря уже о создании на ее основе анимированного аватара.

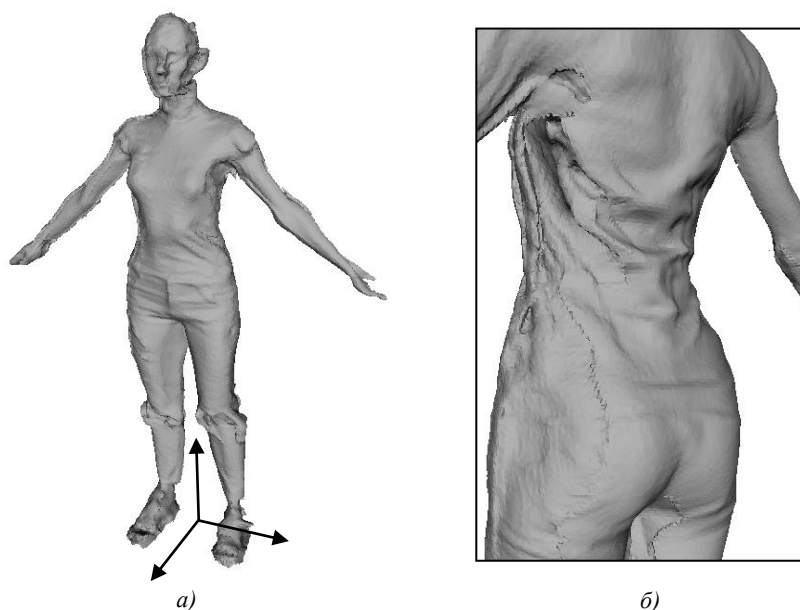


Рис. 2. Модель, полученная с помощью Microsoft Kinect v.2, и система координат сцены (а); артефакты, вызванные складками одежды и погрешностями сканирования (б)

Прежде чем приступить к снятию мерок, необходимо выполнить постобработку, в результате которой из модели удаляются складки и неровности одежды. Фактически постобработка выполняет виртуальное раздевание, решая таким образом проблему, связанную с ограничением 3. В результате создается промежуточная триангуляционная модель поверхности тела, которая может использоваться для оценки геометрических размеров и формы.

Постобработка включает несколько этапов:

- определение ориентации модели и ее трехмерный поворот с тем, чтобы расположить модель вертикально и лицом к наблюдателю;
- идентификацию частей тела (рук, ног, головы и туловища);
- регуляризацию и сглаживание поверхности.

Рассмотрим подробно каждый из этих этапов.

### 3. Ориентация модели

Для идентификации частей тела необходимо знать, как расположена модель относительно наблюдателя. Для этого введем систему координат сцены, расположив ее начало между правой и левой ступнями модели и направив ось  $Y$  в сторону темени, а ось  $X$  – от правой руки в сторону левой руки (см. рис. 2, а). Ось  $Z$  выбирается таким образом, чтобы система координат была правой (т. е. ось  $Z$  должна быть направлена в сторону наблюдателя). Точность определения начала координат может находиться в диапазоне 2–5 см, для осей допускается отклонение

в несколько градусов. Таким образом, требуется найти аффинное преобразование вершин модели из мировой системы координат, задаваемой 3D-сканером, в систему координат сцены.

Вычисление требуемого преобразования значительно упрощается, если обратить внимание на следующий момент: вращающаяся платформа, сканируемое тело и 3D-сканер изначально расположены друг относительно друга таким образом, что исходную модель можно считать расположенной примерно вертикально (ось тела отклоняется от вертикали не более чем на  $10\text{--}20^\circ$ ). Потребуем также, чтобы сканирование начиналось в момент, когда человек был расположен к камере лицом с допустимым отклонением  $20\text{--}30^\circ$ .

Обозначим через  $C_x(t_1, t_2)$ ,  $0 \leq t_1 < t_2 \leq 1$ , центр масс вершин триангуляционной модели,  $x$ -координата которых лежит в диапазоне от  $(1 - t_1)x_{\min} + t_1x_{\max}$  до  $(1 - t_2)x_{\min} + t_2x_{\max}$ , где  $x_{\min}$  и  $x_{\max}$  – соответственно минимальная и максимальная  $x$ -координаты вершин. Аналогично определим точки  $C_y(t_1, t_2)$  и  $C_z(t_1, t_2)$ . Например,  $C_y(0, 0,05)$  обозначает центр масс вершин в области ступней (при условии, что модель расположена вертикально).

Определим начало  $p_0$  системы координат сцены как точку с координатами  $(x_0, y_0, z_0)$ , где значения  $x_0$  и  $z_0$  совпадают с соответствующими координатами точки  $C_y(0, 0,1)$ , а  $y_0 = y_{\min}$ . Перенесем начало координат в точку  $p_0$ . Теперь для нахождения нужного преобразования остается рассчитать матрицу трехмерного поворота, совмещающего оси системы координат сцены с осями мировой системы координат.

Вычислим единичный вектор  $r_y$ , задающий ось  $Y$  системы координат сцены:

$$r_y = \frac{C_y(0,9, 1) - C_y(0, 0,1)}{\|C_y(0,9, 1) - C_y(0, 0,1)\|}.$$

Аналогично вычислим вектор  $r_x$ , задающий ось  $X$ , и вектор  $r_z$  как векторное произведение  $r_x$  и  $r_y$ :

$$r_x = \frac{C_x(0,9, 1) - C_x(0, 0,1)}{\|C_x(0,9, 1) - C_x(0, 0,1)\|}, \quad r_z = r_x \times r_y.$$

Матрица искомого преобразования трехмерного поворота строится со столбцами  $r_x$ ,  $r_y$  и  $r_z$  [11]. Результат перехода к системе координат сцены показан на рис. 3.

#### 4. Идентификация частей тела

Чтобы оценить геометрические характеристики 3D-модели тела, представленной в виде триангуляционной поверхности, нужно иметь информацию о том, к какой части модели относится тот или иной участок этой поверхности. Другими словами, нужно присвоить каждой вершине модели признак принадлежности одной из частей тела. Для снятия мерок интерес представляют шесть таких частей: голова, туловище, правая рука, левая рука, правая нога и левая нога.

Воспользуемся подходом, описанным в [1]. Для данной триангуляционной поверхности построим сечения горизонтальными плоскостями, опускаясь сверху вниз с мелким равным шагом. Каждое сечение представляет собой замкнутый многоугольный контур, описывающий геометрию пересечения поверхности с горизонтальной плоскостью на заданной высоте. Анализ площадей и специальных функций формы этих сечений позволяет достаточно быстро и точно вычислить границу между туловищем, головой и конечностями.

*Граница шеи и плеч.* Сечения последовательно просматриваются, начиная с самого верхнего. Анализ их площадей позволяет с приемлемой точностью установить два соседних сечения, таких, что верхнее относится к области шеи, а нижнее – к плечам. Для этого вычислим отношение

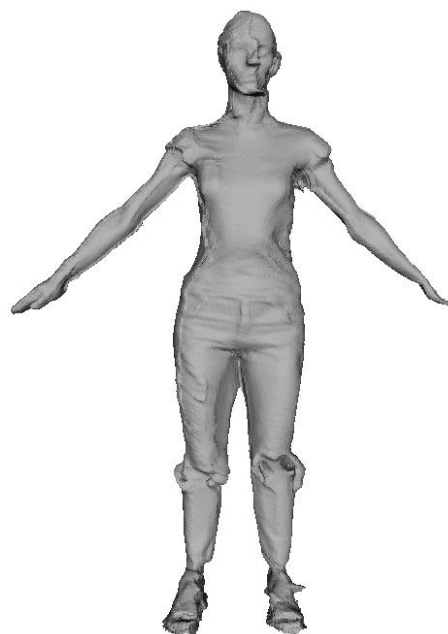


Рис. 3. Модель, ориентированная вертикально и лицом к наблюдателю

$$r_i = \frac{w_i - \bar{w}_i}{\bar{w}_i},$$

где  $w_i$  – ширина  $i$ -го сечения;  $\bar{w}_i$  – средняя ширина просмотренных сечений, начиная с самого верхнего до  $i$ -го. Искомая граница определяется пороговым значением  $r^*$  для величины  $r_i$ , превышение которого означает переход от шеи к плечам. Эмпирическим путем установлено, что для большинства примеров  $0,85 \leq r^* \leq 0,95$ .

*Граница ног.* Для определения сечения, отделяющего ноги от туловища, в [1] анализируется количество замкнутых контуров, принадлежащих одному сечению: сечение, в котором два контура сливаются в один, соответствует искомой границе между ногами и туловищем. Однако на практике возникают проблемы, связанные со спецификой сканирования тела человека: на границе конечностей и туловища возникают так называемые мембраны – участки поверхности, где фрагменты одежды или выпуклые части тела находятся близко (или прижимаются) друг к другу, порождая тем самым один сплошной контур вместо двух (рис. 4).

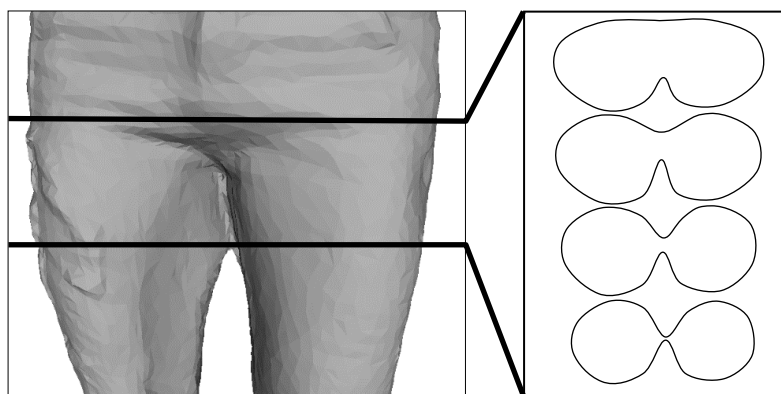


Рис. 4. Мембрана в области границы «ноги – туловище» и соответствующие горизонтальные сечения

Вместо анализа числа контуров введем функцию формы сечения  $S_i = A_i/P_i$ , где  $A_i$  и  $P_i$  обозначают соответственно суммарную площадь и суммарный периметр контуров  $i$ -го сечения. При фиксированной площади максимальное значение функции  $S_i$  имеет сечение в форме окружности. Вместе с тем пересечение мембраны с плоскостью сечения практически не увеличивает значение  $S_i$  из-за малой площади этого пересечения. Анализируя первые разности  $\Delta S_{i+1} = S_{i+1} - S_i$ , можно с высокой точностью установить сечение, на котором происходит резкий рост функции формы (вследствие уменьшения периметра), т. е. сечение, где участок с мембраной переходит в сечение, находящееся в области туловища. На рис. 5 изображен график изменения значений  $\Delta S_i$ , начиная с нижнего сечения, на котором указан индекс сечения, соответствующего искомой границе ног и туловища.

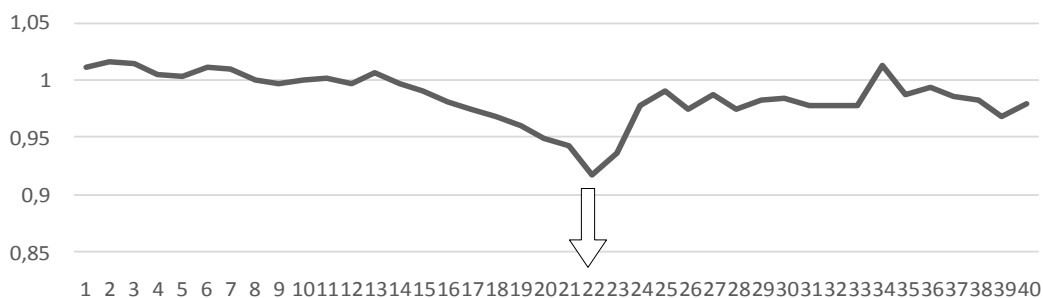


Рис. 5. График изменения первых разностей функции формы. Стрелкой показан номер сечения, соответствующий границе ног и туловища

*Граница рук.* Границы рук и туловища определяются отдельно для левой и правой руки с использованием описанного выше алгоритма с той разницей, что рассматриваются не горизонтальные, а вертикальные сечения и перед их вычислением модель необходимо повернуть вокруг оси  $Z$  так, чтобы соответствующая рука была расположена горизонтально. Поворот осуществляется по часовой стрелке для левой руки и против часовой стрелки – для правой. Пример распознавания частей тела для черновой модели изображен на рис. 6.

## 5. Сглаживание

Сглаживание модели необходимо для выполнения ограничения 3, требующего удаления неровностей и складок одежды. Предлагаемый здесь алгоритм использует набор сечений, полученных на предыдущем шаге. Сглаживание выполняется в три этапа:

1. Горизонтальное сглаживание: устраняются осцилляции контуров сечений, вызванных неровностями одежды и погрешностями сканирования.

2. Регуляризация модели: триангуляционная поверхность исходной модели преобразуется в поверхность с регулярной сеткой узлов, в которой горизонтальные линии совпадают с контурами сечений исходной модели.

3. Вертикальное сглаживание: регулярная поверхность сглаживается с помощью одного из стандартных алгоритмов, например Gaussian Blur, скользящее среднее и т. д.

### 5.1. Горизонтальное сглаживание

Каждый контур сечения представляет собой многоугольную область, повторяющую форму одежды (если сканируемый человек был одет) на уровне данного сечения. Заметим, что если бы одежда отсутствовала, то контур имел бы более гладкую форму, напоминающую окружность или эллипс, и вписывался бы в контур с одеждой. Таким образом, задача сводится к поиску кривой с ограниченной кривизной, вписанной в исходный контур сечения. После того как такой контур будет найден, он заменит исходный контур сечения.

В данной работе для расчета вписанного контура использовался алгоритм, основанный на обходе Грэхема [12] (рис. 7).



Рис. 7. Примеры гладких контуров ограниченной кривизны, вписанных в горизонтальные сечения модели

### 5.2. Регуляризация и вертикальное сглаживание

В процессе регуляризации хаотически расположенные вершины триангуляционной поверхности заменяются на регулярную сетку узлов наподобие меридианов и параллелей. Регуляризация проводится отдельно для туловища и каждой конечности с целью устранения нежелательных артефактов, оставшихся после этапа горизонтального сглаживания. В результате модель тела распадается на шесть отдельных сглаженных поверхностей, что, впрочем, не является препятствием для снятия с них необходимых мерок.

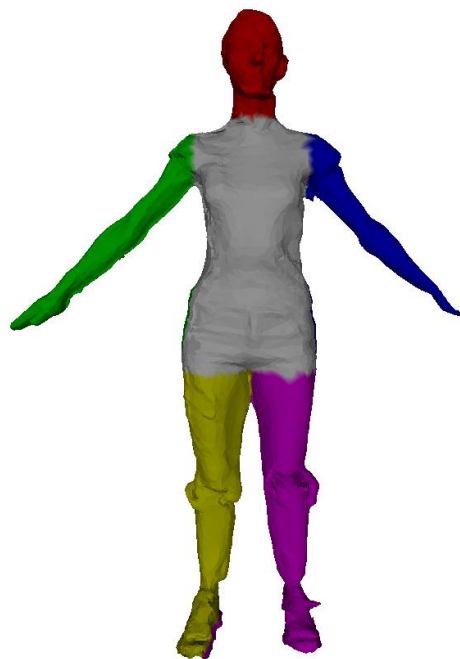


Рис. 6. Модель с распознанными частями тела

Построение новой сетки узлов основано на предварительно построенных сечениях соответствующей части тела. Не теряя общности, будем считать, что речь идет о горизонтальных сечениях (например, туловища или ног). Для каждого контура сечения, сглаженного на предыдущем шаге, введем полярную систему координат с началом в центре масс сечения и осью, параллельной оси  $X$  системы координат сцены. Для некоторого  $n$  выберем шаг  $\Delta\alpha = 2\pi/n$  полярного угла и вычислим точки  $p_i$  контура, соответствующие полярным углам  $\alpha_i = i\Delta\alpha$ ,  $i = 0, \dots, n - 1$ . Заменим вершины контура на точки  $p_i$ . Выполнение этой процедуры для каждого сечения даст новый набор вершин, лежащих в плоскостях сечений и распределенных равномерно в соответствии с угловым шагом  $\Delta\alpha$ . Пример поверхности, построенной после регуляризации, показан на рис. 8, а.

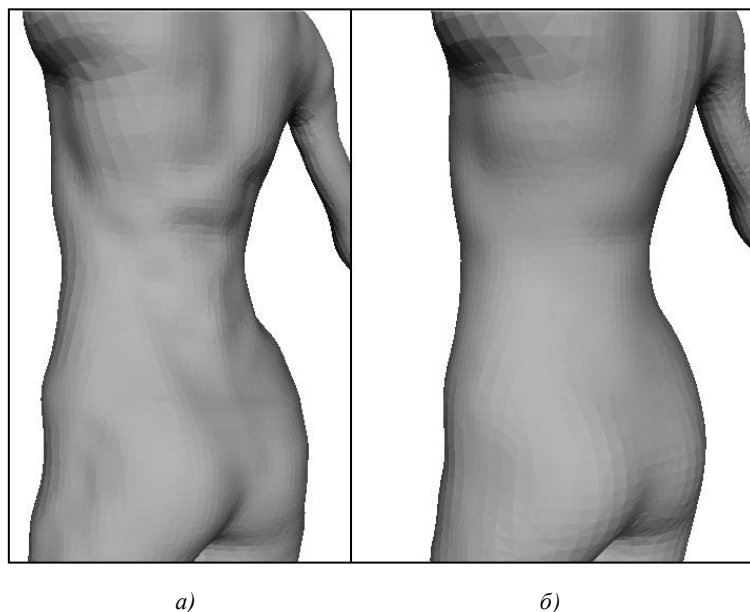


Рис. 8. Регулярная поверхность до применения процедуры вертикального сглаживания (а) и после (б)

После построения регулярной модели поверхности она может быть сглажена любым алгоритмом сглаживания функции, заданной на регулярной сетке, например Gaussian Blur [13] или «скользящее среднее» [14].

Пример регулярной сглаженной поверхности приведен на рис. 8, б. Как видно из рисунка, следы одежды практически полностью устранены, что позволяет произвести измерения геометрических параметров нужных участков поверхности с высокой точностью. Эксперименты показали, что абсолютная ошибка измерения не превосходит 0,2–0,3 см. Это вполне приемлемо для изготовления моделей одежды.

## 6. Применение мерок к аватару

Дальнейшая обработка производится с участием эталонного аватара – модели тела человека, подготовленной заранее с помощью приложений Autodesk Maya или 3ds Max (рис. 9). Для модификации формы аватара использовалась библиотека FBX SDK [15], разработанная компанией Autodesk специально для работы со скелетными моделями, представленными в формате FBX.

К аватару применяются мерки, снятые с исходной модели после ее постобработки. Сначала аватар масштабируется по вертикали для грубой аппроксимации пропорций тела. Дальнейшая трансформация модели выпол-

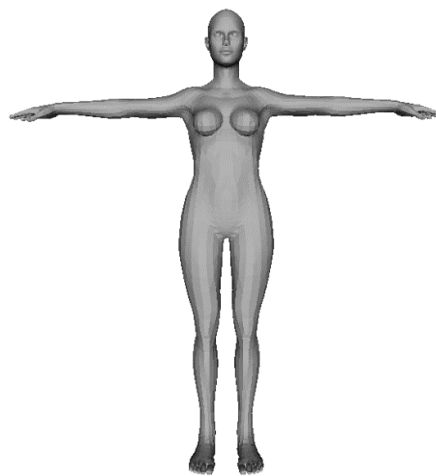


Рис. 9. Искусственный аватар

няется с использованием функций FBX SDK отдельно для каждого участка поверхности.

Рассмотрим этот этап более подробно. Согласно концепции скелетной модели аватар представляет собой иерархическую систему суставов (joints), которая расположена внутри триангуляционной поверхности, имитирующей «кожу» аватара. При трансформации родительского сустава соответствующее преобразование передается дочерним суставам в виде матрицы. С каждым суставом связан некоторый кластер вершин поверхности аватара. Вершина поверхности может принадлежать нескольким кластерам, причем в каждом кластере ей присваивается определенный вес. При движении аватара к каждой вершине применяется аффинная комбинация преобразований, коэффициенты которой равны весам этой вершины в содержащих ее кластерах. Если эти веса подобраны правильно, то в области суставов создается реалистическая имитация растяжения кожи без разрывов и изломов.

Применение мерок производится с помощью двух типов преобразований для суставов: масштабирования и параллельного переноса. Например, для изменения обхвата туловища в области талии применяется масштабирование соответствующего сустава спины, для изменения ширины плеч – параллельный перенос плечевых суставов вдоль оси  $X$ .

При необходимости для уточнения фигуры и осанки аватара может быть использован алгоритм оптимизации формы триангуляционной поверхности, описанный в [16]. Поверхность рассматривается как упругая модель с заданными граничными условиями в виде фиксированных точек исходной модели, координаты которых известны. В качестве условий упругости используются линеаризованные реберные условия специального вида. Приходим к задаче минимизации наименьших квадратов, в которой переменными являются поправки в координаты вершин аватара. На практике система имеет размер порядка 30 000 переменных и 35 000 уравнений, которая решается с помощью пакетов Eigen и SuiteSparse за 1–2 с.

Результат применения описанных преобразований к искусственному аватару показан на рис. 10.

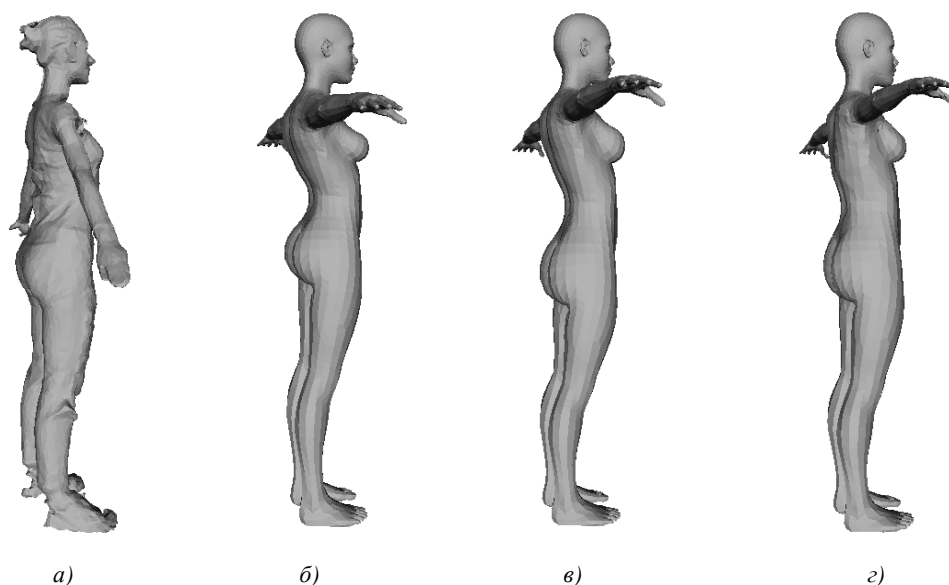


Рис. 10. Отсканированная модель (а), исходный искусственный аватар (б), аватар после вертикального масштабирования (в), аватар после применения всех мерок с помощью FBX SDK и корректировки осанки с помощью алгоритма оптимизации формы (г)

## Заключение

В работе описаны алгоритмы, составляющие основу программно-аппаратного комплекса, использующего данные сканирования человека с помощью сенсорного контроллера Microsoft Kinect v.2. Результатом работы комплекса является 3D-модель человека с геометрическими характеристиками, близкими к параметрам сканируемого человека. Алгоритмы работают после-

довательно, составляя единую технологию, отличительной особенностью которой является высокая точность получения геометрических параметров формы и осанки человека, а также возможность применения созданной модели в приложениях, связанных с 3D-моделированием.

Работа выполнена в рамках научно-исследовательского проекта, проводимого компанией EPAM Systems.

### Список литературы

1. Ju, X. Automatic segmentation of 3-D humanbody scans / X. Ju, N. Werghi, J.P. Siebert // IASTED Intern. Conf. Comput. Graph. Imag. (CGIM 2000). – Las Vegas, NV, 2000.
2. Allen, B. The space of human body shapes: reconstruction and parameterization from range scans / B. Allen, B. Curless, Z. Popovic // Proceedings of ACM SIGGRAPH. – San Diego, CA, 2003. – Vol. 22, no. 3. – P. 587–594.
3. Werghi, N. Segmentation and Modeling of Full Human BodyShape From 3-D Scan Data: A Survey / N. Werghi // IEEE transactions on systems, man, and cybernetics. Part C: applications and reviews. – 2007. – Vol. 37, no. 6. – P. 1122–1136.
4. On the segmentation of scanned 3D human body models / M. Đonlić [et al.] // 8th Intern. Scientific Conf. on Kinesiology. – Opatija, Croatia, 2017. – P. 694–697.
5. TriMirror [Electronic resource]. – Mode of access : <http://www.trimirror.com>. – Date of access : 14.07.2017.
6. Tuka3d [Electronic resource]. – Mode of access : <https://www.tukatech.com/3D-fashion-design-software/TUKA3D>. – Date of access : 14.07.2017.
7. The Best 3D Scanners [Electronic resource]. – Mode of access : <http://www.toptenreviews.com/computers/scanners/best-3d-scanners>. – Date of access : 14.07.2017.
8. Kinect Fusion [Electronic resource]. – Mode of access : <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/dn188670.aspx>. – Date of access : 14.07.2017.
9. Newcombe, R. Dynamicfusion: Reconstruction and tracking of non-rigid scenes in real-time / R. Newcombe, D. Fox, S. Seitz // Proceedings of the IEEE conf. on computer vision and pattern recognition. – Boston, MA, USA, 2015. – P. 343–352.
10. Intel® RealSense™ Developer Kit (R200) [Electronic resource]. – Mode of access : <https://click.intel.com/intelr-realsensetm-developer-kit-r200-2312.html>. – Date of access : 14.07.2017.
11. Васильков, Д.М. Геометрическое моделирование и компьютерная графика: вычислительные и алгоритмические основы : курс лекций / Д.М. Васильков. – Минск : БГУ, 2011.
12. Препарата, Ф. Вычислительная геометрия: введение / Ф. Препарата, М. Шеймос. – М. : Мир, 1987.
13. Gaussian blur [Electronic resource]. – Mode of access : [https://en.wikipedia.org/wiki/Gaussian\\_blur](https://en.wikipedia.org/wiki/Gaussian_blur). – Date of access : 14.07.2017.
14. Moving average [Electronic resource]. – Mode of access : [https://en.wikipedia.org/wiki/Moving\\_average](https://en.wikipedia.org/wiki/Moving_average). – Date of access : 14.07.2017.
15. FBX SDK Programmer's guide [Electronic resource]. – Mode of access : <http://docs.autodesk.com/FBX/2014/ENU/FBX-SDK-Documentation>. – Date of access : 14.07.2017.
16. Васильков, Д.М. Кусочно-гладкая интерполяционная модель поверхности минимальной кривизны / Д.М. Васильков // Танаевские чтения : доклады Шестой Междунар. науч. конф. (27–28 марта 2014 г., Минск). – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2014. – С. 34–39.

Поступила 01.08.2017



---

**D.M. Vasilkov****ESTIMATION OF HUMAN BODY SHAPE PARAMETERS  
USING MICROSOFT KINECTSENSOR**

In the paper a human body shape estimation technology based on scan data acquired from sensor controller Microsoft Kinect is described. This device includes an RGB camera and a depth sensor that provides, for each pixel of the image, a distance from the camera focus to the object. A scan session produces a triangulated high-density surface noised with oscillations, isolated fragments and holes. When scanning a human, additional noise comes from garment folds and wrinkles. An algorithm of creating a sparse and regular 3D human body model (avatar) free of these defects, which approximates shape, posture and basic metrics of the scanned body is proposed. This solution finds application in individual clothing industry and computer games, as well.

## ЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

УДК 519.7

Ю.В. Поттосин

## МЕТОД МНОГОБЛОЧНОЙ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ СИСТЕМЫ ЧАСТИЧНЫХ БУЛЕВЫХ ФУНКЦИЙ

Описывается метод многоблочной параллельной декомпозиции системы частичных булевых функций, представленной парой троичных матриц. Метод предполагает рассмотрение графов ортогональности строк указанных матриц и сводится к нахождению полных двудольных подграфов (биклик) в одном из этих графов и кратчайшему покрытию множества ребер другого графа этими подграфами.

## Введение

Под декомпозицией системы булевых функций понимается ее представление в виде суперпозиции двух или более систем функций, каждая из которых в некотором смысле проще исходной системы. Задача декомпозиции булевых функций является одной из важных и сложных задач из области логического проектирования, успешное решение которой непосредственно влияет на качество и стоимость проектируемых цифровых устройств. Декомпозиция системы булевых функций, описывающей поведение некоторого дискретного устройства, ведет к разбиению его на отдельные блоки, что облегчает дальнейшую процедуру логического синтеза. Как показано в работах [1, 2], данной задаче посвящено значительное количество статей, однако она еще требует исследований [3]. В настоящей статье рассматривается задача декомпозиции системы булевых функций в следующей постановке.

Задана система частичных (не полностью определенных) булевых функций в виде векторной функции  $f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x))$ , где компонентами вектора  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  являются булевы переменные, составляющие множество  $X$ . Требуется найти суперпозицию  $f(x) \leq \Phi(g_1(z_1), g_2(z_2), \dots, g_k(z_k))$ , где  $z_1, z_2, \dots, z_k$  – векторные переменные, компонентами которых служат соответственно переменные из подмножеств  $Z_1, Z_2, \dots, Z_k$  (возможно, пересекающихся) множества  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , а символ  $\leq$  обозначает отношение реализации, т. е. значения компонент  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m$  векторной функции  $\Phi$  совпадают со значениями компонент функции  $f$  везде, где эти значения определены. При этом мощность  $|Z_i|$  ( $i = 1, 2, \dots, k$ ) должна быть ограничена некоторой заданной величиной  $p$ , а число  $k$  должно быть минимальным и меньшим, чем  $n$ . Указанная декомпозиция определяет структуру логической схемы (рис. 1), где блоки реализуют функции, составляющие искомую суперпозицию. Величина  $p$  может определяться, например, ограничением на число входных полюсов блоков, реализующих функции  $g_1, g_2, \dots, g_k$ . Такой вид декомпозиции назван *многоблочной параллельной декомпозицией* [4]. Подобная задача при  $k = 2$  решалась в статье [5].

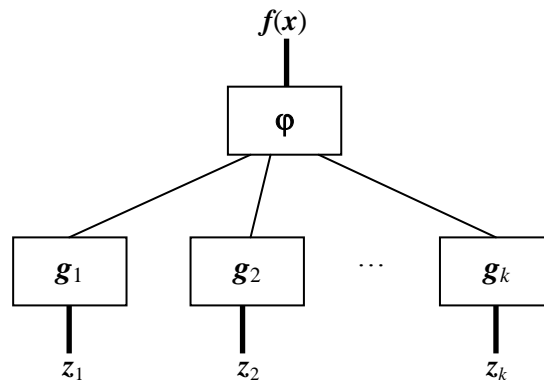


Рис. 1. Структура логической схемы

В подавляющем большинстве публикаций, рассматривающих задачу декомпозиции булевых функций, подмножества  $Z_1, Z_2, \dots, Z_k$  считаются заданными [2, 4, 6, 7]. Вопросу поиска таких подмножеств, при которых существует соответствующая декомпозиция, посвящено не так много публикаций. Среди работ, где рассматривается данный вопрос, можно назвать [8–13]. В настоящей статье предлагается метод, не требующий конкретного задания подмножеств  $Z_1, Z_2, \dots, Z_k$ . Он использует подход, описанный в работе [14].

## 1. Описание метода

Предлагаемый метод решения задачи декомпозиции булевых функций требует интервального задания системы частичных булевых функций [3] в виде пары троичных матриц  $X, F$  размерности  $l \times n$  и  $l \times m$  соответственно. Столбцы матрицы  $X$  соответствуют переменным  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , а столбцы матрицы  $F$  – функциям  $f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)$ . Строки матриц  $X$  и  $F$  имеют единую нумерацию. Строка матрицы  $X$  представляет интервал булева пространства, а соответствующая ей строка матрицы  $F$  – значения функций на этом интервале. Символ « $\leftarrow$ » в  $i$ -й строке и  $j$ -м столбце матрицы  $F$  означает, что  $i$ -й интервал не используется для задания функции  $f_j(x)$ . Значения всех функций заданной системы не определены на той части булева пространства, которая не охвачена интервалами, представленными строками матрицы  $X$ . Строки матриц  $X$  и  $F$  имеют общую естественную нумерацию.

Рассмотрим графы  $G_X = (V, E_X)$  и  $G_F = (V, E_F)$ , где множество вершин  $V$  является множеством общих номеров строк матриц  $X$  и  $F$ , а множества ребер  $E_X$  и  $E_F$  – множествами пар номеров ортогональных строк матриц  $X$  и  $F$  соответственно. Две строки троичной матрицы ортогональны, если имеется столбец, у которого в одной из этих строк расположен нуль, а в другой – единица [3]. Система функций задана корректно, если  $E_F \subseteq E_X$ , т. е.  $G_F$  является остовным подграфом графа  $G_X$ .

*Замечание.* Любая пара матриц  $(X, F)$  указанного вида может рассматриваться как представление некоторой системы частичных булевых функций, если граф  $G_F$  является остовным подграфом графа  $G_X$ .

Каждому ребру из множества  $E_X$  приписано множество переменных из множества  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , по которым соответствующие строки ортогональны. Полному двудольному подграфу, или *биклике*, графа  $G_X$  припишем множество переменных из  $X$ , взятых по одной из каждого ребра, принадлежащего данной биклике. Биклику назовем *допустимой*, если число приписанных ей переменных не превышает  $p$ . Допустимую биклику назовем *полезной*, если она содержит хотя бы одно ребро из множества  $E_F$ .

Множество переменных, приписываемых биклике, определяется следующим образом. Пусть  $\{x_i, x_j, \dots, x_k\}$  – множество переменных, по которым ортогональны две строки, соответствующие ребру из множества  $E_X$ . Образует элементарную дизъюнкцию  $x_i \vee x_j \vee \dots \vee x_k$  из этих переменных. Получим конъюнктивную нормальную форму (КНФ), членами которой будут указанные дизъюнкции, взятые по всем ребрам, входящим в данную биклику. После удаления возможных поглощаемых элементарных дизъюнкций преобразуем полученную КНФ, раскрыв скобки, в дизъюнктивную нормальную форму (ДНФ). Множество переменных, приписанных биклике, составят переменные, входящие в элементарную конъюнкцию минимального ранга полученной ДНФ.

*Утверждение.* Для системы частичных булевых функций  $f(x)$ , заданной троичными матрицами  $X$  и  $F$ , существует реализующая ее суперпозиция  $\varphi(g_1(z_1), g_2(z_2), \dots, g_k(z_k))$ , если существует покрытие множества  $E_F$  полезными допустимыми бикликами графа  $G_X$ , число которых  $k$ .

Пусть получено указанное покрытие бикликами  $B_1, B_2, \dots, B_k$ . Каждая биклика  $B_i$  может быть задана парой множеств вершин  $\langle V_i', V_i'' \rangle$ , поскольку каждая вершина из  $V_i'$  связана в биклике ребрами со всеми вершинами из  $V_i''$ . Каждая функция  $g_i(z_i)$  задается матрицами  $X_i$  и  $F_i$ . Матрица  $X_i$  является минором матрицы  $X$ , образованным столбцами, которые соответствуют переменным, приписанным биклике  $B_i$ . Матрица  $F_i$  состоит из одного столбца, где в строке с номером, соответствующим вершине из  $V_i'$ , находится 0, в строке с номером, соответствующей



- $\{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}, \{v_6\} - x_1 x_2 x_4;$
- $\{v_1, v_2, v_3, v_5\}, \{v_4, v_6\} - x_1 x_4;$
- $\{v_1, v_2, v_3, v_5, v_6\}, \{v_4\} - x_2 x_4 (x_1 \vee x_3 \vee x_5) (x_1 \vee x_3 \vee x_6) = x_1 x_2 x_4 \vee x_2 x_3 x_4 \vee x_2 x_4 x_5 x_6;$
- $\{v_1, v_2, v_4\}, \{v_3, v_6\} - x_2 x_4 (x_1 \vee x_3 \vee x_5) = x_1 x_2 x_4 \vee x_2 x_3 x_4 \vee x_2 x_4 x_5;$
- $\{v_1, v_2, v_4, v_5, v_6\}, \{v_3\} - (x_5 \vee x_6) (x_1 \vee x_5) = x_1 x_6 \vee x_5;$
- $\{v_1, v_2, v_5\}, \{v_3, v_4, v_6\} - x_1 x_4 (x_5 \vee x_6) = x_1 x_4 x_5 \vee x_1 x_4 x_6;$
- $\{v_1, v_2, v_6\}, \{v_3, v_4\} - x_2 x_4 (x_1 \vee x_5) = x_1 x_2 x_4 \vee x_2 x_4 x_5;$
- $\{v_1, v_3, v_4, v_5\}, \{v_2, v_6\} - x_1 x_2 x_4;$
- $\{v_1, v_3, v_4, v_5, v_6\}, \{v_2\} - x_1 x_4;$
- $\{v_1, v_3, v_5\}, \{v_2, v_4, v_6\} - x_1;$
- $\{v_1, v_3, v_5, v_6\}, \{v_2, v_4\} - x_1 x_2 x_4;$
- $\{v_1, v_4\}, \{v_2, v_3, v_6\} - x_1 x_2 x_4;$
- $\{v_1, v_4, v_5\}, \{v_3, v_6\} - x_1 x_2 (x_5 \vee x_6) = x_1 x_2 x_5 \vee x_1 x_2 x_6;$
- $\{v_1, v_4, v_5, v_6\}, \{v_2, v_3\} - x_1 x_4 (x_5 \vee x_6) = x_1 x_4 x_5 \vee x_1 x_4 x_6;$
- $\{v_1, v_5\}, \{v_2, v_3, v_4, v_6\} - x_1 (x_5 \vee x_6) = x_1 x_5 \vee x_1 x_6;$
- $\{v_1, v_5, v_6\}, \{v_3, v_4\} - x_2 (x_5 \vee x_6) (x_1 \vee x_3 \vee x_6) (x_1 \vee x_5) = x_1 x_2 x_5 \vee x_1 x_2 x_6 \vee x_2 x_3 x_5 \vee x_2 x_5 x_6;$
- $\{v_1, v_6\}, \{v_2, v_3, v_4\} - x_1 x_2 x_4;$
- $\{v_2, v_3, v_4, v_6\}, \{v_5\} - x_1 (x_5 \vee x_6) = x_1 x_5 \vee x_1 x_6.$

Таблица покрытия этими бикликами ребер графа  $G_F$  имеет вид табл. 2. Из всех полученных кратчайших покрытий выбрано то, которое имеет наименьшее объединение множеств переменных, приписанных входящим в это покрытие бикликам, и наименьшую сумму рангов соответствующих элементарных конъюнкций.

Таблица 2

	$v_1v_2$	$v_1v_3$	$v_1v_4$	$v_1v_6$	$v_2v_3$	$v_2v_5$	$v_2v_6$	$v_3v_4$	$v_3v_5$	$v_3v_6$	$v_4v_5$	$v_4v_6$
$\{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}, \{v_6\}$				1			1			1		1
$\{v_1, v_2, v_3, v_5\}, \{v_4, v_6\}$			1	1			1	1		1	1	
$\{v_1, v_2, v_3, v_5, v_6\}, \{v_4\}$			1					1			1	1
$\{v_1, v_2, v_4\}, \{v_3, v_6\}$		1		1	1		1	1				1
$\{v_1, v_2, v_4, v_5, v_6\}, \{v_3\}$		1			1			1	1	1		
$\{v_1, v_2, v_5\}, \{v_3, v_4, v_6\}$		1	1	1	1		1		1		1	
$\{v_1, v_2, v_6\}, \{v_3, v_4\}$		1	1		1					1		1
$\{v_1, v_3, v_4, v_5\}, \{v_2, v_6\}$	1			1	1	1				1		1
$\{v_1, v_3, v_4, v_5, v_6\}, \{v_2\}$	1				1	1	1					
$\{v_1, v_3, v_5\}, \{v_2, v_4, v_6\}$	1		1	1	1	1		1		1	1	
$\{v_1, v_3, v_5, v_6\}, \{v_2, v_4\}$	1		1		1	1	1	1			1	1
$\{v_1, v_4\}, \{v_2, v_3, v_6\}$	1	1		1				1				1
$\{v_1, v_4, v_5\}, \{v_3, v_6\}$		1		1				1	1			1
$\{v_1, v_4, v_5, v_6\}, \{v_2, v_3\}$	1	1				1	1	1	1	1		
$\{v_1, v_5\}, \{v_2, v_3, v_4, v_6\}$	1	1	1	1		1			1		1	
$\{v_1, v_5, v_6\}, \{v_3, v_4\}$		1	1						1	1	1	1
$\{v_1, v_6\}, \{v_2, v_3, v_4\}$	1	1	1				1			1		1
$\{v_2, v_3, v_4, v_6\}, \{v_5\}$						1			1		1	

Данное покрытие состоит из следующих биклик (из соответствующих ДНФ выбрано по одной элементарной конъюнкции):

$$\begin{aligned} &\{v_1, v_5\}, \{v_2, v_3, v_4, v_6\} - x_1 x_5; \\ &\{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}, \{v_6\} - x_1 x_2 x_4; \\ &\{v_1, v_2, v_4, v_5, v_6\}, \{v_3\} - x_5. \end{aligned}$$

Искомую суперпозицию задают представленные ниже матрицы:

$$\begin{aligned} X_1 = \begin{matrix} x_1 & x_5 \\ \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} & \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} \end{matrix}, F_1 = \begin{matrix} g_1 \\ \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} & \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} \end{matrix}; & X_2 = \begin{matrix} x_1 & x_2 & x_4 \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & - & 0 \\ 1 & - & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & - & - \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} \end{matrix}, F_2 = \begin{matrix} g_2 \\ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} & \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} \end{matrix}; & X_3 = \begin{matrix} x_5 \\ \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} & \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} \end{matrix}, F_3 = \begin{matrix} g_3 \\ \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} & \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} \end{matrix}; \end{aligned}$$

$$U = \begin{matrix} g_1 & g_2 & g_3 \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} & \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} \end{matrix}, \Phi = \begin{matrix} \Phi_1 & \Phi_2 & \Phi_3 \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ - & 1 & 1 \\ 0 & - & 0 \\ 1 & 1 & - \\ - & 0 & 1 \\ 1 & 0 & - \end{bmatrix} & \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} \end{matrix}.$$

После устранения избыточности получим матрицы, представляющие искомые системы частичных булевых функций:

$$\begin{aligned} X_1 = \begin{matrix} x_1 & x_5 \\ \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} & \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} \end{matrix}, F_1 = \begin{matrix} g_1 \\ \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} & \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} \end{matrix}; & X_2 = \begin{matrix} x_1 & x_2 & x_4 \\ \begin{bmatrix} 0 & - & 0 \\ 1 & - & - \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} \end{matrix}, F_2 = \begin{matrix} g_2 \\ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} & \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} \end{matrix}; & X_3 = \begin{matrix} x_5 \\ \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} & \begin{matrix} 1 \\ 2 \end{matrix} \end{matrix}, F_3 = \begin{matrix} g_3 \\ \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} & \begin{matrix} 1 \\ 2 \end{matrix} \end{matrix}; \end{aligned}$$

$$U' = \begin{matrix} g_1 & g_2 & g_3 \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} & \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} \end{matrix}, \Phi' = \begin{matrix} \Phi_1 & \Phi_2 & \Phi_3 \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & - & 0 \\ 1 & 0 & - \end{bmatrix} & \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} \end{matrix}.$$

### Заключение

Предлагаемый метод не всегда может быть реализован на задачах практической размерности ввиду трудоемкости выполнения первых двух этапов процесса декомпозиции. Число всех максимальных биклик в графе может оказаться чрезвычайно большим. Его верхней достижимой границей является  $2^{n-1} - 1$ , где  $n$  – число вершин графа [15]. Метод следует считать основой для разработки эвристических методов решения данной задачи.

**Список литературы**

1. Hassoun, S. Logic Synthesis and Verification. The Springer International Series in Engineering and Computer Science / S. Hassoun, T. Sasao. – Kluwer Academic Publishers, 2001. – 472 p.
2. Perkowski, M.A. A Survey of Literature on Functional Decomposition. Version IV (Technical report) / M.A. Perkowski, S. Grygiel. – Portland, USA : Portland State University, Department of Electrical Engineering, 1995. – 188 p.
3. An improved functional decomposition method based on FAST and the method of removal and operation / F. Yu [et al.] // Intern. Conf. on System Science and Engineering (ICSSE), Dalian, China, Jun. 2012. – Dalian, 2012. – P. 487–492.
4. Закревский, А.Д. Логические основы проектирования дискретных устройств / А.Д. Закревский, Ю.В. Поттосин, Л.Д. Черемисинова. – М. : Физматлит, 2007. – 592 с.
5. Закревский, А.Д. Параллельная декомпозиция системы слабо определенных булевых функций / А.Д. Закревский, А.Е. Перышкин // Логическое проектирование. – Минск : Ин-т техн. кибернетики НАН Беларуси, 2000. – Вып. 5. – С. 59–66.
6. Поттосин, Ю.В. Табличные методы декомпозиции систем полностью определенных булевых функций / Ю.В. Поттосин, Е.А. Шестаков. – Минск : Беларус. наука, 2006. – 327 с.
7. Бибило, П.Н. Декомпозиция булевых функций на основе решения логических уравнений / П.Н. Бибило. – Минск : Беларус. наука, 2009. – 211 с.
8. Files, C.M. New multivalued functional decomposition algorithms based on MDDs / C.M. Files, M.A. Perkowski // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. – 2000. – Vol. 19, no. 9. – P. 1081–1086.
9. Закревский, А.Д. Комбинаторный поиск подходящих разбиений при декомпозиции булевых функций / А.Д. Закревский // Вестник ТГУ. Приложение. – 2006. – № 18. – С. 4–9.
10. Поттосин, Ю.В. Применение аппарата покрытий троичных матриц для поиска разбиения множества аргументов при декомпозиции булевых функций / Ю.В. Поттосин, Е.А. Шестаков // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2011. – № 3(16). – С. 100–107.
11. Rawski, M. Input variable partitioning method for decomposition-based logic synthesis targeted heterogeneous FPGAs / M. Rawski // International Journal of Electronics and Telecommunications. – 2012. – Vol. 58, no. 1. – P. 15–20.
12. Бибило, П.Н. Применение диаграмм двоичного выбора при синтезе логических схем / П.Н. Бибило. – Минск : Беларус. наука, 2014. – 231 с.
13. Taghavi Afshord, S. An input variable partitioning algorithm for functional decomposition of a system of Boolean functions based on the tabular method / S. Taghavi Afshord, Yu.V. Pottosin, B. Arasteh // Discrete Applied Mathematics. – 2015. – Vol. 185. – P. 208–219.
14. Поттосин, Ю.В. Декомпозиция системы частичных булевых функций с помощью покрытия графа полными двудольными подграфами / Ю.В. Поттосин, Е.А. Шестаков // Новые информационные технологии в исследовании дискретных структур : докл. Второй Всерос. конф. – Екатеринбург : УрО РАН, 1998. – С. 185–189.
15. Pottosina, S. Finding maximal complete bipartite subgraphs in a graph / S. Pottosina, Yu. Pottosin, B. Sedliak // J. Applied Mathematics. – 2008. – Vol. 1, no. 1. – P. 75–81.

**Поступила 02.08.2017**

*Объединенный институт проблем  
информатики НАН Беларуси,  
Минск, Сурганова, 6  
e-mail: pott@newman.bas-net.by*

**Yu.V. Pottosin**

**A METHOD FOR MULTI-BLOCK PARALLEL DECOMPOSITION  
OF A SYSTEM OF PARTIAL BOOLEAN FUNCTIONS**

A method for multi-block parallel decomposition of a system of partial Boolean functions represented by a pair of ternary matrices is described. The method involves examining the row orthogonality graphs of those matrices. It is reduced to finding the complete bipartite subgraphs (bicliques) in one of those graphs and finding a shortest cover of the row set of the other graph by those bicliques.



**СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ КРУГЛИКОВ****(к 50-летию со дня рождения)**

10 августа 2017 г. исполнилось 50 лет белорусскому ученому, специалисту в области автоматизации управления сложными системами заместителю генерального директора Объединенного института проблем информатики НАН Беларуси по научной и инновационной работе доктору военных наук, доценту Сергею Владимировичу Кругликову.

С.В. Кругликов родился в Минске. В 1984 г. после окончания средней школы № 147 поступил в Минское высшее инженерное зенитное ракетное училище (ВИЗРУ) ПВО на факультет автоматизированных систем управления зенитных ракетных войск. Будучи студентом третьего курса, возглавил военно-научное общество курсантов факультета и начал активно заниматься научными исследованиями. Одним из первых научно-практических достижений стал разрабо-

танный им в 1987 г., в составе коллектива, прибор для спектральных измерений инфранизких частот шума. Прибор был отправлен на Выставку достижений народного хозяйства СССР, по результатам работы которой С.В. Кругликова наградили бронзовой медалью ВДНХ СССР. В 1988 г. в сборнике научных трудов Института психологии Академии наук СССР опубликована первая научная статья С.В. Кругликова «Проектирование организации деятельности операторов АСУ», которая явилась результатом выполнения его курсового проекта. В 1989 г. после окончания с отличием училища молодой лейтенант С.В. Кругликов был направлен для прохождения дальнейшей службы во 2-й Центральный научно-исследовательский институт Министерства обороны СССР (Тверь) на должность младшего научного сотрудника. Во время работы в этом институте С.В. Кругликов получил богатейший научный опыт по созданию и сопровождению самых современных систем управления для войск противовоздушной обороны. В 1991 г. С.В. Кругликов поступает в очную адъюнктуру Минского ВИЗРУ ПВО, где занимается научными исследованиями в области распознавания классов помех. После окончания адъюнктуры в 1994 г. капитан С.В. Кругликов был назначен на должность младшего научного сотрудника НИЛ-2. В последующие несколько лет в Вооруженных Силах Республики Беларусь произошло большое количество различных реформ. Они затронули и военную науку. Научные коллективы, имеющие богатую историю, реформировались, в большинстве случаев сокращались, известные ученые переходили в частные компании, многие офицеры увольнялись из Вооруженных Сил. Однако С.В. Кругликов продолжал заниматься научными исследованиями со своим научным руководителем кандидатом технических наук Василием Александровичем Кравцовым. С декабря 1996 г. на факультете связи и АСУ теперь уже Военной академии Республики Беларусь создается научно-исследовательская лаборатория под руководством кандидата технических наук, доцента полковника Сергея Александровича Муравьева, в которую и был направлен С.В. Кругликов.

Первое знакомство С.В. Кругликова с коллективом Института технической кибернетики НАН Беларуси состоялось в 1997 г. во время конференции «Pattern Recognition and Information Processing», на которой он выступил с докладом. В 1998 г. С.В. Кругликов успешно защитил кандидатскую диссертацию по техническим наукам, а в 2001 г. ему присвоено ученое звание доцента.

Работая в учреждении образования «Военная академия Республики Беларусь», С.В. Кругликов прошел все научные должности, включая начальника научно-исследовательской лаборатории, начальника научно-исследовательской части и заместителя начальника академии по научной работе. Он эффективно применяет свои знания на всех этапах выполнения проектов: от научной идеи до практической реализации. В рамках выполнения инициативной ОКР под его руководством (главный конструктор) изготовлен беспилотный авиационный комплекс

«Москит» (изделие ВР-12) ближнего радиуса действия, принятый на вооружение Вооруженных Сил Республики Беларусь. В настоящее время на 558 Авиационном ремонтном заводе (Барановичи) освоено серийное производство данного комплекса, который активно поступает в войска.

В 2013 г. С.В. Кругликов защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора военных наук, в 2014 г. его избирают членом-корреспондентом Академии военных наук Российской Федерации.

После увольнения из Вооруженных Сил с августа 2015 г. по август 2016 г. С.В. Кругликов работал в ОАО «АГАТ-СИСТЕМ», где под его руководством (главный конструктор ОКР) был изготовлен опытный образец системы автоматического взлета и посадки беспилотных летательных аппаратов в рамках выполнения ОКР подпрограммы № 2 ГНТП «БАК и технологии». С сентября 2016 г. С.В. Кругликов работает в ОИПИ НАН Беларуси.

В предыдущие годы научно-исследовательская деятельность С.В. Кругликова была тесно связана с работами, проводимыми в ОИПИ НАН Беларуси. В рамках выполнения программы Союзного государства «Триада» возглавляемым им научным подразделением Военной академии на суперкомпьютере СКИФ реализованы программные комплексы в интересах Вооруженных Сил. В рамках Гособоронзаказа на 2011 г. под научным руководством С.В. Кругликова изготовлен действующий макет объединенной системы навигации, связи и опознавания в тактическом звене управления, являющийся прототипом АСУ отдельного механизированного батальона и прошедший успешные испытания на учениях «Взаимодействие 2013». В рамках НИР «Система» обоснован облик элементов системы вооружения с учетом особенностей сетевых подходов к военным действиям и изготовлен действующий макет разведывательной огневой системы.

В настоящее время основными направлениями деятельности С.В. Кругликова в ОИПИ НАН Беларуси являются:

- руководство научным направлением «Информационные технологии и системы»;
- координация и реализация научно-технической программы Союзного государства «Исследования и разработка высокопроизводительных информационно-вычислительных технологий для увеличения и эффективного использования ресурсного потенциала углеводородного сырья Союзного государства», шифр «СКИФ-НЕДРА»;
- развитие научно-исследовательской сети BASNET и ряд других.

Область научных интересов С.В. Кругликова включает разработку концепций, методологических и научно-методических основ проектирования и эксплуатации автоматизированных информационно-управляющих систем различного назначения. Он опубликовал свыше 250 научных работ, в том числе 6 монографий, получил в соавторстве 10 патентов на изобретения и на полезные модели, подготовил три кандидата и три магистра технических наук.

В 2009 г. С.В. Кругликову была установлена персональная надбавка Президента Республики Беларусь за выдающийся вклад в социально-экономическое развитие республики. Он имеет Государственные награды: медаль «За безупречную службу» III степени (2003 г.), медаль «За безупречную службу» II степени (2011 г.), нагрудный знак «Юбилейная медаль “У гонар 80-годдзя Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі”». Неоднократно на официальных мероприятиях С.В. Кругликов лично докладывал Президенту Республики Беларусь о результатах проведения научных исследований.

Сергей Владимирович Кругликов постоянно повышает свой профессиональный уровень, активно сотрудничает с известными учеными и руководством ряда крупных российских компаний, таких как Государственная корпорация «Ростех», АО «Концерн радиостроения “Вега”», АО «Концерн ВКО “Алмаз – Антей”», ОАО «Концерн “РТИ Системы”». Является членом редакционных коллегий Международного научно-технического журнала «Информационно-измерительные и управляющие системы» издательства «Радиотехника» (Москва) и научного журнала «Информатика».

Коллеги и друзья желают Сергею Владимировичу новых успехов в его многогранной научной и организационной деятельности, здоровья и благополучия.

*А.В. Тузиков, В.А. Латицкий*

## Правила для авторов

В журнале «Информатика» публикуются оригинальные и обзорные статьи, описывающие результаты фундаментальных и прикладных исследований в области информационных технологий, по следующим разделам: математическое моделирование; автоматизация проектирования; обработка сигналов, изображений и речи; информационная безопасность; распознавание образов; системы, приборы и устройства; параллельные вычисления; космические информационные технологии и геоинформатика; интеллектуальные системы; прикладные информационные технологии. К публикации приглашаются отечественные и зарубежные ученые, специалисты в области информационных технологий и информатики, докторанты и аспиранты.

1. Статьи принимаются в редакцию через электронную систему подачи по адресу <http://jinfo.basnet.by> в формате файлов текстовых редакторов Microsoft Word. Объем полной статьи (стандартный формат для завершённых научных статей) – 8–17 стр., включая рисунки и достаточное количество наиболее актуальных ссылок; обзорной статьи (критическое обобщение какой-то исследовательской темы) – обычно от 10 стр., включая все основные ссылки. 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.

Изложенный в статье материал должен быть четко структурированным: введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение (выводы).

2. Статьи о результатах работ, проведенных в научных учреждениях, должны иметь разрешение на публикацию (сопроводительное письмо за подписью руководителя или выписку из заседания ученого совета, отдела или кафедры, акт экспертизы).

3. Статья в обязательном порядке должна иметь индекс универсальной десятичной классификации (УДК). Инициалы и фамилии всех авторов, полное название учреждения, где работают авторы, с указанием города и страны, адрес электронной почты каждого автора и номер телефона, аннотация (150–250 слов), ключевые слова (7–10) приводятся на русском и английском языках.

4. Аннотация (авторское резюме) должна кратко представлять результаты работы и быть информативной, содержательной. Приветствуется структура аннотации, повторяющая структуру статьи и включающая введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение.

5. Формулы, рисунки, таблицы в статье должны быть пронумерованы в соответствии с порядком их упоминания в тексте. Ссылки на рисунки и таблицы в тексте обязательны. 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. Прямо набираются греческие и русские буквы; математические символы ( $\sin$ ,  $\lg$ ,  $\infty$ ); символы химических элементов (С, Cl,  $\text{CHCl}_3$ ); цифры (римские и арабские); векторы; индексы (верхние и нижние), являющиеся сокращениями слов. Курсивом набираются латинские буквы, 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. Цитируемые в статье фамилии авторов теорем, теорий, законов и т. д. следует приводить в скобках на языке оригинала после русского написания. Например, теорема Эйлера (Euler).

9. Список использованной литературы должен содержать ссылки на источники, получившие международное признание и соответствовать требованиям ГОСТ 7.1–2003 или его более поздней версии 7.5–2008. Номер литературной ссылки в тексте дается порядковым номером в квадратных скобках. Ссылаться на неопубликованные работы не допускается.

10. Отдельно приводится список цитированных источников в *романском* (латинском) алфавите со следующей структурой: авторы (транслитерация), название статьи в транслитерированном варианте [перевод названия статьи на английский язык в квадратных скобках], название русскоязычного источника (транслитерация) [перевод названия источника на английский язык – парафраз (для журналов можно не делать)], выходные данные с обозначениями на английском языке.

Примеры подготовлены по материалам методических рекомендаций «Редакционная подготовка научных журналов для включения в зарубежные индексы цитирования» О.В. Кирилловой

([http://elsevierscience.ru/files/kirilova\\_editorial.pdf](http://elsevierscience.ru/files/kirilova_editorial.pdf)):

### **Статьи из журналов:**

Zagurenko A.G., Korotovskikh V.A., Kolesnikov A.A., Timonov A.V., Kardymon D.V. Tekhniko-ekonomicheskaya optimizatsiya dizaina gidrorazryva plasta [*Techno-economic optimization of the design of hydraulic fracturing*]. Neftyanoe khozyaistvo = Oil Industry, 2008, no.11, pp. 54–57.

### **Описание статьи из электронного источника:**

Swaminathan V., Lepkoswka-White E., Rao B.P. *Browsers or buyers in cyberspace? An investigation of electronic factors influencing electronic exchange*. Journal of Computer-Mediated Communication, 1999, vol.5, no. 2. Available at: <http://www.ascusc.org/jcmc/vol5/issue2/> (Accessed 28 April 2011).

### **Описание статьи из продолжающегося издания (сборника трудов):**

Astakhov M.V., Tagantsev T.V. Eksperimental'noe issledovanie prochnosti soedinenii «stal'-kompozit» [*Experimental study of the strength of joints "steel-composite"*]. Trudy MGTU «Matematicheskoe modelirovanie slozhnykh tekhnicheskikh sistem» [*Proc. of the Bauman MSTU "Mathematical Modeling of Complex Technical Systems"*], 2006, no. 593, pp. 125-130.

### **Описание материалов конференций:**

Usmanov T.S., Gusmanov A.A., Mullagalin I.Z., Muhametshina R.Ju., Chervyakova A.N., Sveshnikov A.V. Osobennosti proektirovaniya razrabotki mestorozhdeniy s primeneniem gidrorazryva plasta [*Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing*]. Trudy 6 Mezhdunarodnogo Simpoziuma "Novye resursoberegayushchie tekhnologii nedropol'zovaniya i povysheniya neftegazootdachi" [*Proc. 6th Int. Symp. "New energy saving subsoil technologies and the increasing of the oil and gas impact"*]. Moscow, 2007, pp. 267-272.

### **Описание книги (монографии, сборники):**

Izvekov V.I., Serikhin N.A., Abramov A.I. Proektirovanie turbogeneratorov [*Design of turbo-generators*]. Moscow, MEI Publ., 2005, 440 p.

### **Описание интернет-ресурса:**

APA Style (2011). Available at: <http://www.apastyle.org/apa-style-help.aspx> (accessed 5 February 2011).  
[http://www.PravilaTsitirovaniyaIstochnikov \(Rules for the Citing of Sources\) Available at.scribd.com/doc/1034528/](http://www.PravilaTsitirovaniyaIstochnikov(RulesfortheCitingofSources)Availableat.scribd.com/doc/1034528/) (accessed 7 February 2011).

### **Описание диссертации или автореферата диссертации:**

Semenov V.I. Matematicheskoe modelirovanie plazmy v sisteme kompaktnyi tor. Diss. dokt. fiz.-mat. nauk [*Mathematical modeling of the plasma in the compact torus. Dr. phys. and math. sci. diss.*]. Moscow, 2003. 272 p.

### **Описание ГОСТа:**

GOST 8.586.5–2005. Metodika vypolneniia izmerenii. Izmerenie raskhoda i kolichestva zhidkosti i gazov s pomoshch'iu standartnykh suzhaiushchikh ustroystv [*State Standard 8.586.5 – 2005. Method of measurement. Measurement of flow rate and volume of liquids and gases by means of orifice devices*]. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 10 p.

### **Описание патента:**

Palkin M.V., e.a. Sposob orientirovaniia po krenu letatel'nogo apparata s opticheskoi golovkoi samonavedeniia [*The way to orient on the roll of aircraft with optical homing head*]. Patent RF, no. 2280590, 2006.

11. 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.

12. Статьи, направляемые на доработку, должны быть возвращены в исправленном виде с ответами на все замечания.

13. Редакция журнала предоставляет возможность первоочередного опубликования статей, представленных лицами, которые осуществляют послевузовское обучение (аспирантура, докторантура, соискательство) в год завершения обучения.

14. Авторы несут ответственность за направление в редакцию статей, уже опубликованных ранее, или статей, принятых к публикации другими изданиями.

15. Редакция оставляет за собой право на редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи. Окончательное решение о публикации принимается редакционной коллегией.

Тел. для справок: +375(017)284 26 22 либо по электронной почте [rio@newman.bas-net.by](mailto:rio@newman.bas-net.by).

**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