

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
МЕЖДУНАРОДНАЯ АКАДЕМИЯ ИНФОРМАТИЗАЦИИ  
СОЮЗ МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И СВЯЗИ РЯЗАНСКОЙ ОБЛАСТИ  
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ В.Ф. УТКИНА

# **СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ**

## **СТНО-2024**

**VII МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-  
ТЕХНИЧЕСКИЙ ФОРУМ**

**Сборник трудов**

**Том 5**

Рязань  
2024

УДК 004 + 001.1 + 681.2+ 681.2+ 681.3+681.5  
С 568

Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2024 [текст]: сб. тр. VII международ. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.5./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2024.

**ISBN 978-5-7722-0401-6**

Т.5: – 272 с.,: ил.

**ISBN 978-5-7722-0406-1**

Сборник включает труды участников VII Международного научно-технического форума «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2024.

В сборнике освещаются вопросы математического моделирования, новых технологий в радиотехнике, телекоммуникациях, электротехнике и радиоэлектронике, вопросы полупроводниковой наноэлектроники, приборостроения, лазерной, микроволновой техники, силовой промышленной электроники, новые технологии в измерительной технике и системах, биомедицинских системах, алгоритмическое и программное обеспечение вычислительной техники, вычислительных сетей и комплексов, вопросы систем автоматизированного проектирования, обработки изображений и управления в технических системах, перспективные технологии в машиностроительном и нефтехимическом производствах, новые технологии и методики в высшем образовании, в т.ч. вопросы гуманитарной и физико-математической подготовки студентов, обучения их иностранным языкам, перспективные технологии электронного обучения, в том числе, дистанционного, вопросы экономики, управления предприятиями и персоналом, менеджмента, а также вопросы гуманитарной сферы.

Авторская позиция и стилистические особенности сохранены.

УДК 004 + 001.1 + 681.2+ 681.2+ 681.3+681.5

**ISBN 978-5-7722-0401-6**

**ISBN 978-5-7722-0406-1**

© Рязанский государственный  
радиотехнический университет, 2024

## **ИНФОРМАЦИЯ О VII МЕЖДУНАРОДНОМ ФОРУМЕ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ» СТНО-2024**

VII Международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2024 состоялся 04.03.2024-06.03.2024 в г. Рязань в Рязанском государственном радиотехническом университете имени В.Ф. Уткина.

В рамках форума «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2024 состоялась работа четырех Международных научно-технических конференций:

«Современные технологии в науке и образовании. Радиотехника и электроника», секции

- Радиотехнические системы и устройства;
- Телекоммуникационные системы и устройства;
- Цифровые информационные технологии реального времени;
- Промышленная силовая электроника, электроэнергетика и электроснабжение;
- Физика полупроводников, микро- и наноэлектроника;
- Микроволновая, оптическая и квантовая электроника;
- Актуальные задачи химических технологий;

«Современные технологии в науке и образовании. Вычислительная техника и автоматизированные системы», секции

- Алгоритмическое и программное обеспечение вычислительных систем и сетей;
- ЭВМ и системы;
- Информационные технологии в конструировании электронных средств;
- Модели искусственного интеллекта в САПР;
- Информационные системы и защита информации;
- Математические методы в научных исследованиях;
- Обработка данных, изображений и управление в технических системах;
- Геоинформационные и космические технологии;
- Автоматизация производственно-технологических процессов в приборо- и машиностроении;

- Информационно-измерительные устройства и системы в технике и медицине;
- Стандартизация и управление качеством;
- Информационные системы и технологии;

«Современные технологии в науке и образовании. Экономика и управление», секции;

- Современные технологии государственного и муниципального управления;
- Экономика, менеджмент и организация производства;
- Бухгалтерский учет, анализ и аудит;
- Экономическая безопасность;
- Внешнеэкономическая деятельность;

«Современные технологии в науке и образовании. Новые технологии и методы в высшем образовании», секции

- Современные технологии электронного обучения;
- Иностранный язык в техническом вузе;
- Лингвистика и межкультурная коммуникация;
- Направления и формы гуманитаризации высшего образования и гуманитарная подготовка студентов;
- Методы преподавания и организация учебного процесса в вузе;
- Физико-математическая подготовка студентов;
- Вопросы воспитательной работы в высшей школе;
- Особенности военного образования на современном этапе.

### **Организационный комитет Форума:**

Чиркин М.В., ректор, д.ф.-м.н., проф. – председатель

Гусев С.И., проректор по научной работе и инновациям, д.т.н., проф. – зам. председателя;

Корячко А.В., проректор по учебной работе, к.т.н., доц. – зам. председателя;

Миловзоров О.В., зам. начальника управления организации научных исследований, к.т.н, доц. – координатор, главный редактор сборника трудов Форума;

Мионов В.В., ответственный редактор сборника трудов Форума;

Устинова Л.С., начальник отдела информационного обеспечения – отв. за информационную поддержку;

### **члены оргкомитета:**

Бабаян П.В., зав. кафедрой автоматике и информационных технологий в управлении, к.т.н., доц.;

Бухенский К.В., зав. кафедрой высшей математики, к.ф.-м.н., доц.;

Витязев В.В., зав. кафедрой телекоммуникаций и основ радиотехники, д.т.н., проф.;

Волченков В.А., доцент кафедры телекоммуникаций и основ радиотехники, к.т.н.;

Горлин О.А., доцент кафедры электронных приборов, к.т.н., доц.;

Губарев А.В., доцент кафедры информационно-измерительной и биомедицинской техники, к.т.н., доц.;

Дмитриев В.Т., зав. кафедрой радиоуправления и связи, д.т.н., доц.;

Дмитриева Т.А., доцент кафедры вычислительной и прикладной математики, к.т.н., доц.;

Евдокимова Е.Н., зав. кафедрой экономики, менеджмента и организации производства, д.э.н., проф.;

Еремеев В.В., директор НИИ «Фотон», д.т.н., проф.;

Есенина Н.Е., зав. кафедрой иностранных языков, к.п.н., доц.;

Жулев В.И., зав. кафедрой информационно-измерительной и биомедицинской техники, д.т.н., проф.;

Карпунина Е.В., доцент кафедры экономической безопасности, анализа и учета, к.э.н., доц.;

Кислицына Т.С., старший преподаватель кафедры радиотехнических систем;

Клейносова Н.П., директор центра дистанционного обучения, к.п.н., доц.;

Клочко В.К., профессор кафедры автоматике и информационных технологий в управлении, д.т.н., проф.;

Коваленко В.В., зав. кафедрой химической технологии, к.т.н., доц.;

Корячко В.П., зав. кафедрой систем автоматизированного проектирования вычислительных средств, д.т.н., проф.;

Костров Б.В., зав. кафедрой электронных вычислительных машин, д.т.н., проф.;

Кошелев В.И., зав. кафедрой радиотехнических систем, д.т.н., проф.;

Крошилина С.В., доцент кафедры вычислительной и прикладной математики, к.т.н., доц.;

Круглов С.А., зав. кафедрой промышленной электроники, д.т.н., доц.;

Кузьмин Ю.М., доцент кафедры информационной безопасности, к.т.н., доц.;

Куприна О.Г., доцент кафедры иностранных языков, к.филол.н., доц.;

Ленков М.В., декан факультета автоматике и информационных технологий в управлении, зав. кафедрой автоматизации информационных и технологических процессов, к.т.н., доц.

Литвинов В.Г., зав. кафедрой микро- и нанoeлектроники, д.ф.-м.н., доц.;

Лукиянова Г.С., доцент кафедры высшей математики, к.ф.-м.н., доц.;

Маметова Ю.Ф., доцент кафедры иностранных языков, к.п.н., доц.;

Мельник О.В., профессор кафедры информационно-измерительной и биомедицинской техники, д.т.н., доц.;



Меркулов Ю.А., старший преподаватель кафедры автоматизации информационных и технологических процессов;

Миронов В.В., старший преподаватель кафедры Воздушно-космических сил;

Митрошин А.А., доцент кафедры систем автоматизированного проектирования вычислительных средств, к.т.н., доц.;

Мишустин В.Г., доцент кафедры микро- и нанoeлектроники, к.ф.-м.н., доц.;

Никифоров М.Б., доцент кафедры электронных вычислительных машин, к.т.н., доц.;

Овечкин Г.В., зав. кафедрой вычислительной и прикладной математики, д.т.н., проф.;

Паршин А.Ю., доцент кафедры радиотехнических устройств, к.т.н., доц.;

Паршин Ю.Н., зав. кафедрой радиотехнических устройств, д.т.н., проф.;

Перфильев С.В., зав. кафедрой государственного, муниципального и корпоративного управления, д.э.н., проф.;

Подгорнова Н.А., доцент кафедры государственного, муниципального и корпоративного управления, к.э.н., доц.;

Пржегорлинский В.Н., зав. кафедрой информационной безопасности, к.т.н., доц.;

Пылькин А.Н., профессор кафедры вычислительной и прикладной математики, д.т.н., проф.;

Сапрыкин А.Н., доцент кафедры систем автоматизированного проектирования вычислительных средств, к.т.н., доц.;

Семенов А.Р., ст.преподаватель кафедры химической технологии, к.ф.-м.н.;

Серебряков А.Е., зам. зав. кафедрой электронных приборов, к.т.н.;

Скрипкина О.В. доцент кафедры экономической безопасности, анализа и учета, к.э.н., доц.;

Соколов А.С., зав. кафедрой истории, философии и права, д.и.н.;

Таганов А.И., профессор кафедры космических технологий, д.т.н., проф.;

Тарасова В.Ю., ассистент кафедры электронных вычислительных машин, магистр;

Харитонов А.Ю., нач. военного учебного центра, полковник, к.т.н., доц.;

Холопов С.И., зав. кафедрой автоматизированных систем управления, к.т.н., доц.;

Цыцына М.И., ассистент кафедры космических технологий, магистр;

Цветков А.А., проректор по молодежной политике;

Чеглакова С.Г., зав. кафедрой экономической безопасности, анализа и учета, д.э.н., проф.;

Челебаев С.В., доцент кафедры автоматизированных систем управления, к.т.н., доц.;

Щевьев А.И., доцент кафедры истории, философии и права, к.п.н., доц..

# МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ»

## СЕКЦИЯ «МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ»

УДК 004.932; ГРНТИ 27.47.17

### АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ 3D-ИЗОБРАЖЕНИЙ ПО ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ПАР СТЕРЕОИЗОБРАЖЕНИЙ

**А.И. Новиков**

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, novikovanatoly@yandex.ru*

*Аннотация.* В работе изложен алгоритм формирования 3D-изображений подстилающей поверхности в плоскости Земли по последовательности пар стереоизображений с использованием матрицы гомографии. Является обобщением известного подхода к совмещению изображений в плоском случае на основе матрицы гомографии на трехмерный случай для сшивания облаков точек. Вместо матрицы гомографии третьего порядка вводится матрица гомографии четвертого порядка, с помощью которой устанавливается связь между соответствующими точками в первом и втором облаках точек. Для каждой пары соответствующих точек формируются три линейных алгебраических уравнения. Оптимальные оценки 15-и элементов матрицы гомографии находятся в результате решения нормальной системы уравнений.

*Ключевые слова:* стереоизображение, матрица гомографии, система линейных уравнений, соответствующие точки

### ALGORITHM FOR THE FORMATION OF 3D IMAGES BASED ON A SEQUENCE OF PAIRS OF STEREO IMAGES

**A.I. Novikov**

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, novikovanatoly@yandex.ru*

*The summary* The paper describes an algorithm for the formation of 3D images of the underlying surface in the plane of the Earth according to a sequence of pairs of stereo images using a homography matrix. It is a generalization of the well-known approach to combining images in the planar case based on the homography matrix to the three-dimensional case for stitching point clouds. Instead of a third-order homography matrix, a fourth-order homography matrix is introduced, which establishes a connection between the corresponding points in the first and second point clouds. Three linear algebraic equations are formed for each pair of corresponding points. Optimal estimates of the 15 elements of the homography matrix are found as a result of solving a normal system of equations.

*Keywords.* Stereo image, homography matrix, system of linear equations, corresponding points

На вход алгоритма формирования 3D изображений подается либо набор из нескольких изображений, либо поток видеоизображений. Пара изображений одного и того же объекта, полученных с помощью двух камер, разнесенных на некоторое расстояние (стереосъемка под разными углами зрения), позволяет найти расстояние от точки съемок до точек поверхности снимаемой сцены. При этом предполагается, что выполнена калибровка камер, устранена дисторсия и, как следствие, изображения одной и той же точки сцены находятся в одинаковых строках на левом и правом кадрах [1].

Сформированная карта глубин позволяет сопоставить каждой точке плоской картинки третью координату – расстояние от камеры до плоскости сцены. В результате этого образу-

ются два облака точек  $V = \{M_i(x_i, y_i, z_i)\}_{i=1}^n$  и  $V' = \{M'_i(x'_i, y'_i, z'_i)\}_{i=1}^m$  в пространстве  $R^3$ . Оба облака являются 3D-образами одной и той же сцены, но со сдвигом во времени. Из-за изменений положения камеры в процессе съемок одно облако точек оказывается смещенным и повернутым в пространстве относительно другого облака. Поэтому сшивание облаков точек требует преобразование точек одного облака к главным осям второго облака.

Для выполнения преобразований поворота и сдвига в пространстве  $R^3$ , необходимо найти в первом и втором облаках некоторое количество пар, так называемых ключевых (соответствующих) точек  $M_j, M'_j$ , являющиеся образами одинаковых точек реальной сцены. Множество  $G = \{M_j, M'_j\}_{j=1}^k$  таких точек является основой для определения параметров преобразования  $F$ , позволяющего «сшить» две поверхности (два облака точек).

Подлежащее определению преобразование  $F: X' \rightarrow X$  предполагает последовательное выполнение двух операций: операции поворота, реализуемой с помощью матрицы поворота  $\mathbf{R} = (r_{ij})_{i,j=1}^3$ , и операции сдвига, реализуемой с помощью вектора  $\mathbf{t} = (t_x, t_y, t_z)^T$ . В матричной и координатной формах соответствующее преобразование имеет следующий вид:

$$X = \mathbf{R} \cdot X' + \mathbf{t} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Здесь  $X = (x \ y \ z)^T$  и  $X' = (x' \ y' \ z')^T$  - векторы-столбцы, элементами которых являются координаты ключевых точек  $M_j, M'_j$  из сшиваемых облаков точек.

Поиск матрицы вращений  $\mathbf{R}$  и вектора  $\mathbf{t}$  можно было бы выполнить в результате решения соответствующей оптимизационной задачи  $\|X - (\mathbf{R} \cdot X' + \mathbf{t})\|^2 \rightarrow \min$ . Однако в двумерном случае аналогичная задача совмещения двух плоских изображений была успешно решена с помощью проективного преобразования, основанного на вычислении матрицы гомографии  $\mathbf{H}$  размером  $3 \times 3$  [2-4]. Следуя по аналогии можно попытаться решить задачу совмещения (сшивания) двух облаков точек  $V = \{x_i, y_i, z_i\}_{i=1}^n$  и  $V' = \{x'_i, y'_i, z'_i\}_{i=1}^m$  с помощью матрицы гомографии  $\mathbf{H} = (h_{ij})$  размером  $4 \times 4$ , устанавливающей связь в обобщенных координатах между соответствующими точками  $M_j, M'_j$ , а именно:

$$\begin{pmatrix} \lambda x_i \\ \lambda y_i \\ \lambda z_i \\ \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & h_{34} \\ h_{41} & h_{42} & h_{43} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x'_i \\ y'_i \\ z'_i \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Исключив параметр  $\lambda$  из системы уравнений (2), получим СЛАУ в составе  $3k$  уравнений (по 3 уравнения для каждой пары  $M_i(x_i, y_i, z_i)$  и  $M'_i(x'_i, y'_i, z'_i)$ ,  $i = \overline{1, k}$  ключевых точек из совмещаемых облаков точек):

$$\begin{cases} x'_i h_{11} + y'_i h_{12} + z'_i h_{13} + h_{14} - x_i h_{41} - y_i h_{42} - z_i h_{43} = x_i, \\ x'_i h_{21} + y'_i h_{22} + z'_i h_{23} + h_{24} - x_i h_{41} - y_i h_{42} - z_i h_{43} = y_i, \\ x'_i h_{31} + y'_i h_{32} + z'_i h_{33} + h_{34} - x_i h_{41} - y_i h_{42} - z_i h_{43} = z_i, \end{cases}$$

или в матричном виде

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{G}_H = \mathbf{B}. \quad (3)$$

Матрицу  $\mathbf{A}$  в системе уравнений (3) можно записать в виде блочной матрицы размером  $3k \times 15$ :

$$\mathbf{A}_{3k \times 15} = \begin{pmatrix} \mathbf{Z} & \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{W}_1 \\ \mathbf{O} & \mathbf{Z} & \mathbf{O} & \mathbf{W}_2 \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{Z} & \mathbf{W}_3 \end{pmatrix}.$$

Здесь блоки  $\mathbf{Z}, \mathbf{W}, \mathbf{W}, \mathbf{W}$  - это матрицы  $\mathbf{Z}_{k \times 4} = (x_i, y_i, z_i, 1)_{i=1}^k$ ,  $\mathbf{W}_1 = (-x_i x'_i, -y_i y'_i, -z_i z'_i)_{i=1}^k$ ,  $\mathbf{W}_2 = (-x_i y'_i, -y_i y'_i, -z_i y'_i)_{i=1}^k$ ,  $\mathbf{W}_3 = (-x_i z'_i, -y_i z'_i, -z_i z'_i)_{i=1}^k$ ;  $\mathbf{O}$  - нулевая матрица размером  $k \times 4$ ,  $\mathbf{G}_H$  - вектор-столбец неизвестных размером  $15 \times 1$ :

$$\mathbf{G}_H = (h_{11} \ h_{12} \ h_{13} \ h_{14} \ h_{21} \ h_{22} \ h_{23} \ h_{24} \ h_{31} \ h_{32} \ h_{33} \ h_{34} \ h_{41} \ h_{42} \ h_{43})^T;$$

$\mathbf{B} = (x_1 \ x_2 \ \dots \ x_k \ y_1 \ y_2 \ \dots \ y_k \ z_1 \ z_2 \ \dots \ z_k)^T$  - вектор-столбец свободных членов размером  $3k \times 1$ .

Система уравнений (3) является переопределенной поскольку число уравнений в общем случае существенно больше числа неизвестных. Из-за ошибок измерений такая СЛАУ может оказаться несовместной в классическом смысле. Поэтому будем искать вектор  $\mathbf{G}_H$ , который минимизирует уклонение  $\Delta = \mathbf{A}\mathbf{G}_H - \mathbf{B}$  в евклидовой метрике

$$\|\mathbf{A}\mathbf{G}_H - \mathbf{B}\|_{G_H}^2 \rightarrow \min. \quad (4)$$

Отметим, что подматрица  $\mathbf{R} \equiv \mathbf{H}_R = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{pmatrix}$  в составе матрицы  $\mathbf{H}_{4 \times 4}$  отвечает за

вращение облака точек, а подматрица-столбец  $\mathbf{H}_t = (h_{14} \ h_{24} \ h_{34})^T$  - за сдвиг в пространстве.

Решение задачи (4) методом наименьших квадратов приводит к нормальной СЛАУ

$$(\mathbf{A}^T \mathbf{A}) \mathbf{G}_H = \mathbf{A}^T \mathbf{B} \quad (5)$$

с основной матрицей

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{Z}^T \mathbf{Z} & \mathbf{O}_{4 \times 4} & \mathbf{O} & \mathbf{Z}^T \mathbf{W}_1 \\ \mathbf{O} & \mathbf{Z}^T \mathbf{Z} & \mathbf{O} & \mathbf{Z}^T \mathbf{W}_2 \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \mathbf{Z}^T \mathbf{Z} & \mathbf{Z}^T \mathbf{W}_3 \\ \mathbf{W}_1^T \mathbf{Z} & \mathbf{W}_2^T \mathbf{Z} & \mathbf{W}_3^T \mathbf{Z} & \sum_{i=1}^3 \mathbf{W}_i^T \mathbf{W}_i \end{pmatrix}.$$

Правая часть нормального уравнения (5) имеет следующий вид:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{B} = \left( \mathbf{Z}^T \mathbf{B}_1 \quad \mathbf{Z}^T \mathbf{B}_2 \quad \mathbf{Z}^T \mathbf{B}_3 \quad \sum_{i=1}^3 \mathbf{W}_i^T \mathbf{B}_i \right)^T. \quad \text{В этих выражениях } \mathbf{B}_1 = (x_1 \ x_2 \ \dots \ x_k)^T,$$

$\mathbf{B}_2 = (y_1 \ y_2 \ \dots \ y_k)^T$ ,  $\mathbf{B}_3 = (z_1 \ z_2 \ \dots \ z_k)^T$  - вектор-столбцы размером  $k \times 1$ .

Описанный алгоритм сшивания облаков точек с помощью трехмерной гомографии был апробирован на модельных облаках точек. Они представляют собой фрагменты  $V$  и  $V'$  поверхности гиперболического параболоида

$$V : z = x^2 / 50 - y^2 / 75.$$

Пределы изменения переменных  $x, y$  в фрагментах  $V$  и  $V'$  подобраны так, что они имеют область перекрытия (общую часть), а именно:

$$V = \left\{ (x, y, z) \mid z = x^2 / 50 - y^2 / 75, x = \overline{-10, 20}; y = \overline{-8, 8} \right\},$$

$$V' = \left\{ (x, y, z) \mid z = x^2 / 50 - y^2 / 75, x = \overline{10, 30}; y = \overline{-8, 8} \right\}.$$

Второе облако точек  $V'$  смещено по оси  $Ox$  относительно первого облака на 20 единиц ( $x = \overline{10, 30}$ ). В результате облака  $V$  и  $V'$  имеют общую часть в количестве 187 точек.

Затем второе облако было подвергнуто преобразованиям сдвига по координате  $z$  на 25 единиц, т.е. вектор сдвига имеет вид  $t = (0, 0, 25)^T$ , и поворотам относительно координатных осей  $Oz, Oy, Ox$ , на углы  $3^\circ, 3^\circ, 6^\circ$  соответственно. Преобразованиям поворота соответствует матрица

$$\mathbf{R}(\psi, \theta, \gamma) = T(\psi) \cdot T(\theta) \cdot T(\gamma) = \begin{pmatrix} 0,9973 & -0,0466 & 0,0574 \\ 0,0523 & 0,9934 & -0,1017 \\ -0,0523 & 0,1044 & 0,9932 \end{pmatrix}.$$

Следующий этап эксперимента заключался в нахождении ключевых точек, установлении соответствия между ними и собственно в совмещении облаков точек. На рисунке 1 приведены сформированные облака точек  $V$  и  $V'$  вместе с иллюстрацией установленного соответствия между ключевыми точками.

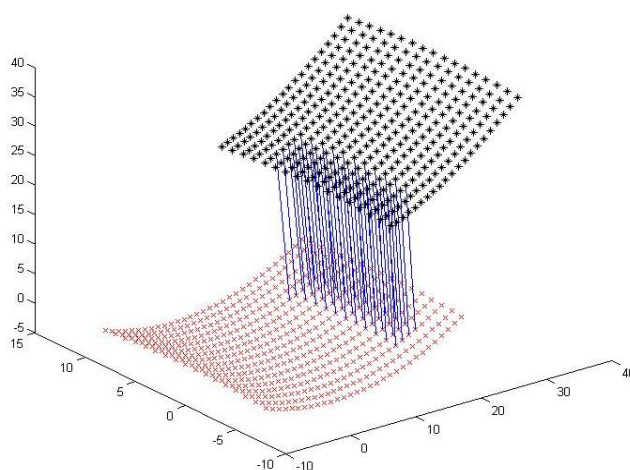


Рис. 1. Облака точек  $V, V'$  и установленные соответствия между ключевыми точками

Для установления соответствия между ключевыми точками в составе облаков точек использовался подход, описанный в работе [5]. Описание ключевых точек осуществлялось с

помощью дескрипторов, в качестве которых выступали векторы нормалей  $\mathbf{n} = \hat{a}(\hat{a}, \hat{b}, -1)$ . В составе этих векторов пара чисел  $\hat{a}$ ,  $\hat{b}$  – это МНК-оценки коэффициентов  $a, b$  в уравнениях плоскостей  $z = ax + by$ , аппроксимирующих фрагмент поверхности в окрестности каждой точки одного и другого облаков точек  $V$  и  $V'$

Алгоритм поиска ключевых точек и установления соответствия между ними позволил сформировать подмножества  $\{M_i(x_i, y_i, z_i)\}_{i=1}^k$  и  $\{M'_i(x_i, y_i, z_i)\}_{i=1}^k$  пар ключевых точек в количестве 45 пар.

В результате решения СЛАУ (5) была получена следующая матрица гомографии

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} 0,997 & -0,047 & 0,057 & 2,58 \cdot 10^{-10} \\ 0,052 & 0,993 & -0,102 & 7,16 \cdot 10^{-12} \\ -0,052 & 0,104 & 0,993 & 25,0 \\ -2,29 \cdot 10^{-12} & -2,36 \cdot 10^{-15} & 3,69 \cdot 10^{-12} & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Подматрица

$$\mathbf{H}_R = \begin{pmatrix} 0,997 & -0,047 & 0,057 \\ 0,052 & 0,993 & -0,102 \\ -0,052 & 0,104 & 0,993 \end{pmatrix}$$

в составе матрицы  $\mathbf{H}$  (6) является матрицей вращений. Сравнение элементов этой матрицы с соответствующими элементами матрицы  $\mathbf{R}(\psi, \theta, \gamma)$ , приведенной выше, говорит о том, что их элементы совпадают с точностью до трех знаков после запятой. Подматрица  $\mathbf{H}_t = (2,58 \cdot 10^{-10} \quad 7,16 \cdot 10^{-12} \quad 25,0)$  в последнем столбце матрицы (6) также дает практически точную оценку вектора сдвига  $t = 25$

На рисунке 2 приведен результат совмещения двух облаков точек. В нижней части рисунка изображено первое облако точек  $V$ , а в верхней части – результат совмещения первого облака со вторым.

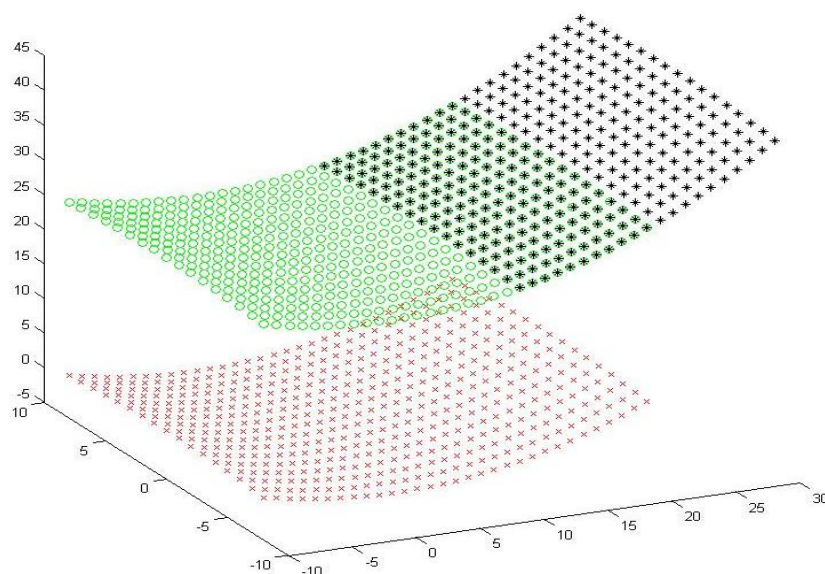


Рис. 2. Результат совмещения облаков точек с помощью трехмерной гомографии

Проведенный эксперимент подтвердил возможность применения матрицы гомографии в трехмерном случае для совмещения облаков точек. Необходимо отметить, что практически идеальное совмещение облаков точек было получено при точно заданных координатах точек в этих облаках.

Для выяснения влияния случайных ошибок в измерении координат ключевых точек на качество сшивки облаков точек были выполнены дополнительные эксперименты. В этих экспериментах вносились случайные ошибки в координаты точек в составе каждого облака. Выяснилось, что относительно небольшие искажения координат приводят к заметным отклонениям точек в сшитых облаках точек от их теоретических значений. При этом наиболее значимые искажения происходят на большом расстоянии от области перекрытия облаков точек.

Поэтому требуются дополнительные исследования для стабилизации результатов сшивки облаков в условиях неточно известных координат точек в составе совмещаемых облаков. Один из возможных путей решения проблемы заключается в сведении задачи безусловной минимизации (4) к задаче на условный экстремум. Для этого нужно ввести в целевую функцию стабилизирующий функционал и параметр регуляризации [6].

### Библиографический список

1. Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration Pattern Analysis and Machine Intelligence// IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 22, Issue 11, 2000. – Pp. 1330-1336.
2. А.И. Ефимов, А.И. Новиков. Алгоритм поэтапного уточнения проективного преобразования для совмещения изображений// Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 2. – С. 258-266. – DOI: 18287/2412-6179-2016-40-2-258-266.
3. Anatoly I. Novikov, Victoria A. Sablina, Aleksey I. Efimov, Michael B. Nikiforov. Contour Analysis in the tasks of real and virtual images superimposition// Journal Coupled Systems and Multiscale Dynamics, vol 4(4), 2016. – Pp. 251-259. (Doi: 10.1166/jcsmd. 2016.1112 J. Coupled Syst. Multiscale Dyn. vol 4(4)/2330-152X/2016/251/009).
4. Victoria A. Sablina, Anatoly I. Novikov, Michael B. Nikiforov, and Alexander A. Loginov, Contour Analysis Application for Object Detection in Aerial Image Sequence, 3<sup>rd</sup> Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO) Proceedings. Budva, Montenegro, 2014. – Pp. 102-107.
5. Черников И.С. Трехмерная реконструкция и распознавание по наборам дальнометрических данных/ И.С. Черников, А.А. Крыловецкий// Компьютерное моделирование 2009: труды международной научно-технической конференции. – Санкт-Петербург, 2009. – С. 284-287.
6. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука. 1979. – 284.

УДК 004.932; ГРНТИ 28.23.15

## ФИЛЬТРАЦИЯ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ШУМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЕТЕКТОРА ГРАНИЦ

А.В. Пронькин

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, antoniopronkin@mail.ru

*Аннотация.* В работе рассматриваются существующие методы фильтрации периодического шума, приводятся примеры и особенности их использования. Исследуется подход фильтрации периодических помех с применением дискретного преобразования Фурье для возможности анализа и модификации частотных характеристик цифрового изображения. Представлены примеры алгоритмов формирования масок для подавления шума отечественных и зарубежных авторов. Более подробно описан алгоритм формирования масок с применением детектора границ, проведены экспериментальные исследования работы алгоритма и представлены численные оценки качества его работы.

*Ключевые слова:* обработка изображений, фильтрация помех, периодический шум, дискретное преобразование Фурье, детектор границ.

## PERIODIC NOISE FILTERING USING EDGE DETECTOR

A.V. Pronkin

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, antoniopronkin@mail.ru

*The summary.* The paper considers existing methods of periodic noise filtering, gives examples and peculiarities of their use. The approach of periodic noise filtering using discrete Fourier transform to analyze and modify the frequency characteristics of digital images is studied. Examples of mask formation algorithms for noise suppression by domestic and foreign authors are presented. The algorithm of mask formation using a boundary detector is described in more detail, experimental studies of the algorithm's operation are carried out and numerical evaluations of the quality of its work are presented.

*Keywords:* image processing, noise filtering, periodic noise, discrete Fourier transform, boundary detector.

Современные летательные аппараты оснащены бортовыми системами технического зрения (СТЗ), выполняющими большое количество операций, направленных на решение целевых задач и повышение безопасности полетов. В любой СТЗ одной из важнейших является подсистема предварительной обработки изображений [1, 2]. В ней, в свою очередь, основной является задача фильтрации шума.

Наиболее типичным для цифровых изображений является дискретный белый шум и импульсные помехи [2]. Способы фильтрации такого шума хорошо изучены и рассматривались как отечественными [3, 4], так и зарубежными авторами [5, 6].

Периодический шум не столь типичен в бортовых СТЗ летательных аппаратов, однако его влияние может существенно исказить результаты работы алгоритмов обработки изображений [2]. Известно большое количество работ, посвященных фильтрации периодического шума [7]. Как правило, такие помехи выражаются в виде белых, серых или черных полос, расположенных горизонтально, вертикально или под некоторым углом (рисунок 1), которые могут быть вызваны блоками питания, устройствами передачи и приема информации, радиолокационными сигналами.

### Алгоритмы фильтрации периодических помех

Большинство существующих подходов к фильтрации периодического шума используют спектральные преобразования для уменьшения влияния помех в пространстве, схожем по характеристикам с природой периодических помех. Как правило, используется некоторое преобразование зашумленного изображения для его разложения на гармонические колебания с последующей модификацией амплитудного спектра и применением обратного преобразования. На практике, в качестве преобразований используют дискретное прямое и обратное преобразование Фурье (ДПФ) и его модификации [8].

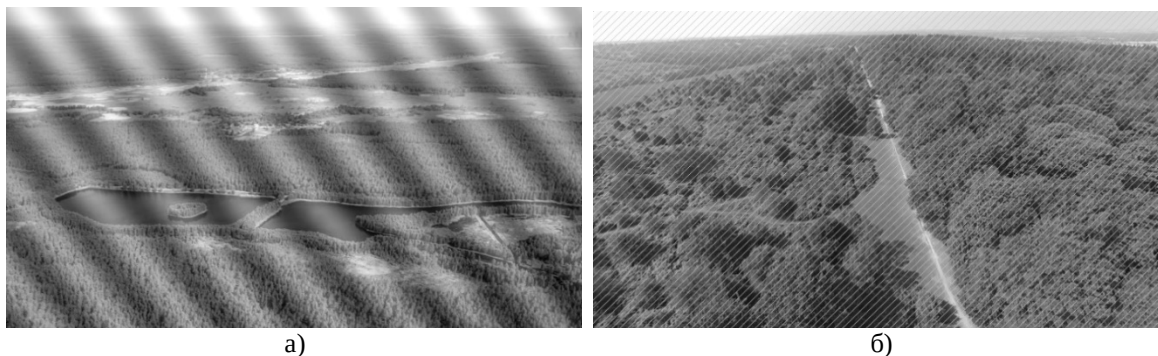


Рис. 1. Изображения с наложенным периодическим шумом



Рассмотрим изображение  $\mathbf{I} = (I_{mn})$ ,  $m = \overline{0, M-1}$ ,  $n = \overline{0, N-1}$  размером  $M \times N$ , представленное матрицей яркостей. В этом случае, прямое ДПФ изображения  $\mathbf{I}$  задается формулой

$$F_{ks} = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} I_{mn} e^{-j2\pi\left(\frac{km}{M} + \frac{sn}{N}\right)}, \quad k = \overline{0, M-1}, \quad s = \overline{0, N-1}.$$

Матрица  $\mathbf{F} = (F_{ks})$  коэффициентов прямого ДПФ имеет тот же размер  $M \times N$ , причем коэффициенты  $F_{ks} = \text{Re}(F_{ks}) + j \text{Im}(F_{ks})$ , где  $j$  – мнимая единица, содержат информация о вкладе соответствующей частотной составляющей в исходный сигнал. Амплитудный спектр, выражающий числовую оценку вклада каждой частотной составляющей, можно вычислить по формуле

$$\text{Amp}_{ks} = \left( (\text{Re}(F_{ks}))^2 + (\text{Im}(F_{ks}))^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad k = \overline{0, M-1}, \quad s = \overline{0, N-1}.$$

На рисунке 2, а представлен амплитудный спектр изображения 1, б, где амплитуда выражена яркостью пикселей (более темные участки указывают на большее значение), а на рисунке 2, б показана часть амплитудного спектра области интереса, вклад определенной частоты (выраженной локальными максимумами) в оригинальном изображении.

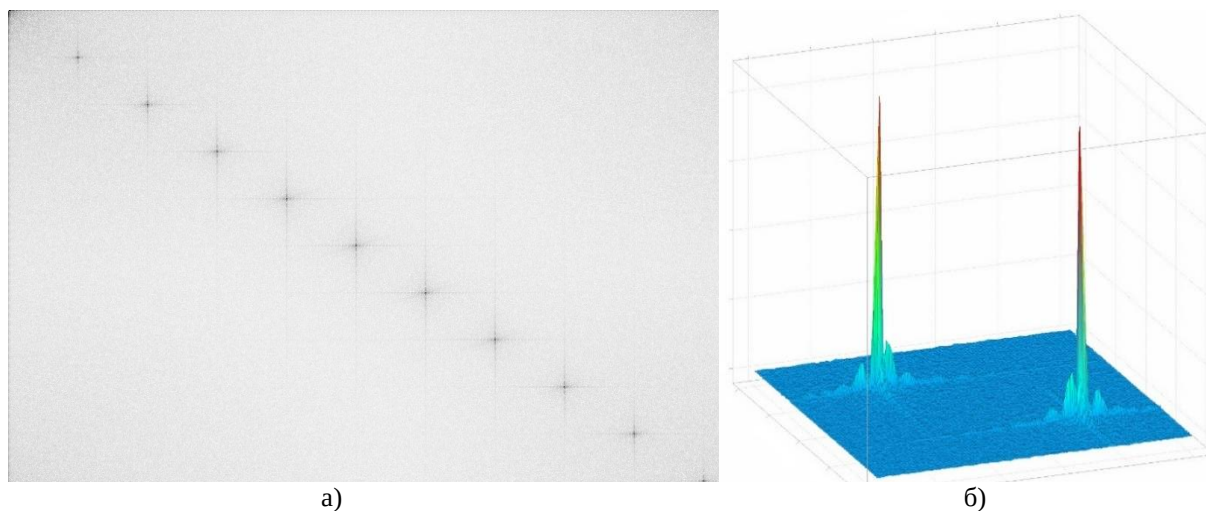


Рис. 2. Амплитудный спектр изображения (а) и его часть (б)

В работе [9] рассматриваются варианты расположения локальных максимумов амплитудного спектра в зависимости от угла наложения периодических помех. Так, периодический шум, выраженный горизонтальными линиями, порождает локальные максимумы вдоль вертикальной оси амплитудного спектра. В свою очередь, вертикальным линиям будут соответствовать локальные максимумы на горизонтальной оси амплитудного спектра, а наклонным – диагональные локальные максимумы.

Очевидно, что для фильтрации периодических помех на исходном зашумленном изображении необходимо подавить локальные максимумы на амплитудном спектре, чтобы снизить влияние определенных частот. Однако на реальных изображениях амплитудный спектр может иметь более сложную структуру, поэтому поиск локальных максимумов и их подавление с минимальным искажением «полезных» частот является отдельной задачей.

Последним этапом фильтрации периодического шума является преобразование, обратное произведенному на первом шаге. В случае ДПФ применяют обратное преобразование Фурье и его модификации. Для матрицы  $\mathbf{F} = (F_{ks})$  обратное преобразование имеет вид

$$I_{mn} = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{s=0}^{N-1} F_{ks} e^{j2\pi \left( \frac{km}{M} + \frac{sn}{N} \right)}, \quad m = \overline{0, M-1}, n = \overline{0, N-1}.$$

Простейшим вариантом локализовать и отфильтровать локальные максимумы является подход, заключающийся в обнулении значений  $F_{ks}$  в зависимости от значения амплитуды  $Amp_{ks}$ . В качестве порога может использоваться среднее значение амплитудного спектра  $\overline{Amp}$ , в этом случае коэффициенты  $F_{ks}$  модифицируются таким образом, чтобы амплитуда каждого элемента не превышала значения  $\overline{Amp}$ .

Альтернативный подход фильтрации заключается в наложении подготовленных секториальных масок (рисунок 3, а), которые подавляют все значения  $\mathbf{F} = (F_{ks})$ , попадающие под нулевые значения маски. Недостатком такого подхода является необходимость ручного подбора необходимых секториальных масок.

Авторы [10] предлагают использовать кластеризацию RFPCM для локализации локальных максимумов с последующей дилатацией и построением на основе результатов маски для подавления периодического шума (рисунок 3, б). К недостаткам алгоритма можно отнести высокую вычислительную сложность, связанную с необходимостью выполнения этапа кластеризации.

Алгоритм, описанный в работе [11] использует предварительную фильтрацию ядром Гаусса  $3 \times 3$  образа Фурье для получения более гладкого амплитудного спектра, а затем полным перебором локализует максимумы и симметричные им пары. На их основе строится маска звездообразной формы (рисунок 3, в).

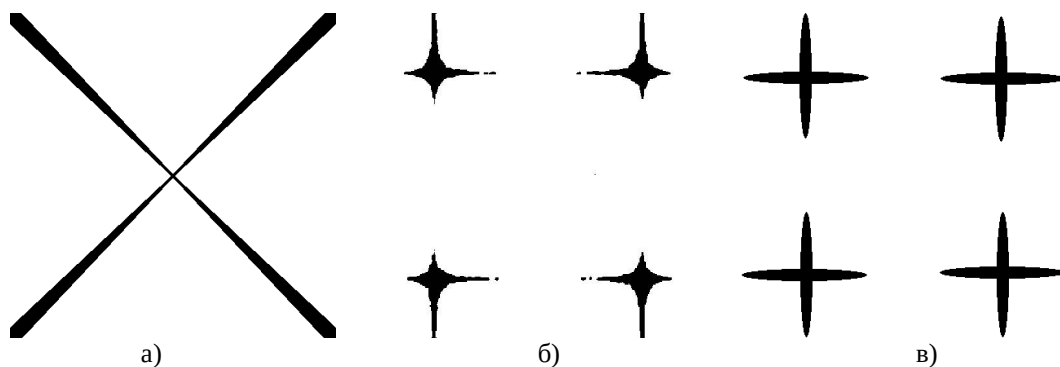


Рис. 3. Примеры масок алгоритмов: а) секториальная маска, б) результат кластеризации и применения операции дилатации, в) маска звездообразной формы

### Применение детектора границ для поиска областей локальных максимумов

В работе [12] представлен адаптивный алгоритм, использующий детектор границ [13] для локализации локальных максимумов и составления маски. Идея заключается в нахождении границ резких перепадов значений амплитудного спектра, которые присутствуют вблизи локальных максимумов и некоторой окрестности. Данный подход позволяет сразу строить маску на основе найденных контуров, не опираясь на геометрию окрестностей локальных максимумов.

Рассмотрим изображение взлетно-посадочной полосы с наложенным под некоторым углом периодическим шумом (рисунок 4, а). После вычисления быстрого преобразования

Фурье на амплитудном спектре будет заметен локальный максимум (на рисунке 5, а представлен фрагмент его окрестности).

После нахождения границ резких перепадов значений амплитуды и двукратного применения операций дилатации и эрозии получаем маску для фильтрации. Применение маски модифицирует матрицу коэффициентов ДПФ  $\mathbf{F} = (F_{ks})$  так, что амплитудный спектр окрестности локального максимума выглядит как на рисунке 5, б.

Вычисляя обратное быстрое преобразование Фурье для обновленных коэффициентов, получаем изображение, представленное на рисунке 4, б.

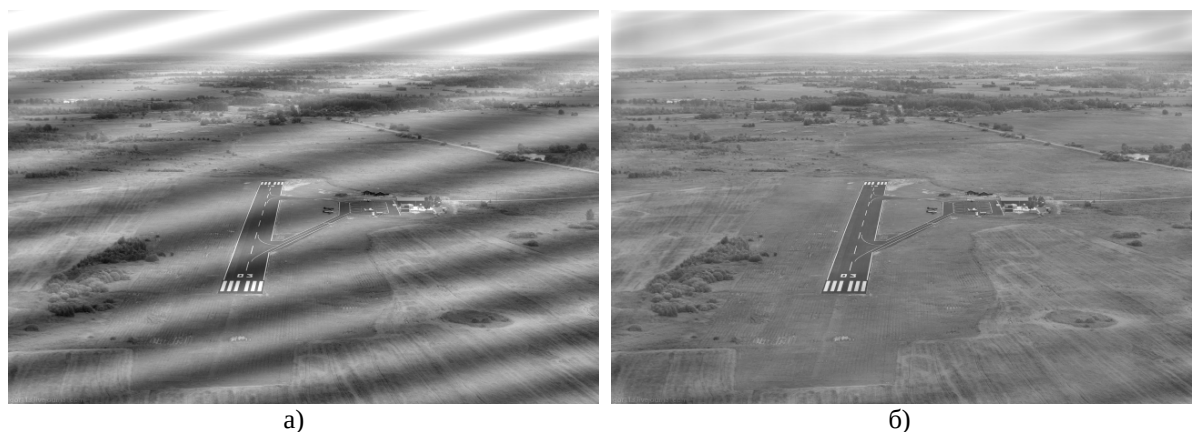


Рис. 4. Изображение взлетно-посадочной полосы:  
а) с наложенным периодическим шумом, б) после фильтрации периодических помех

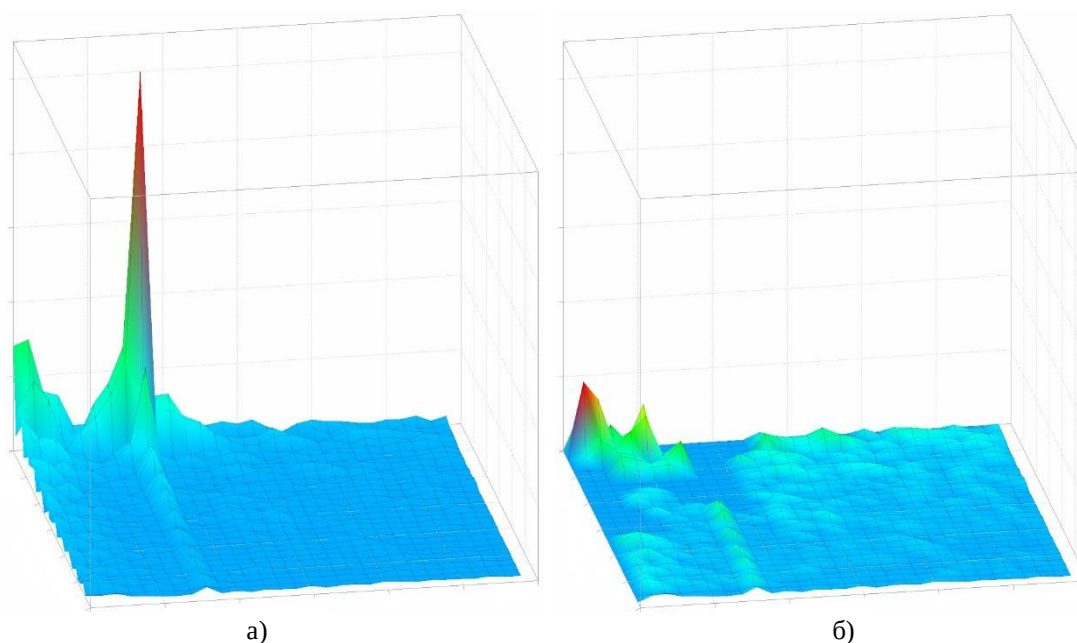


Рис. 5. Часть амплитудный спектра: а) до фильтрации, б) после фильтрации

Для численной оценки качества фильтрации периодических помех рассматривается среднеквадратическая ошибка  $\delta_1$  для оригинального незашумленного изображения  $I_{ij}^{orig}$  и изображения с наложенным шумом  $I_{ij}$ , а также  $\delta_2$  для оригинального незашумленного изображения  $I_{ij}^{orig}$  и изображения после фильтрации периодических помех  $I_{ij}^{восст}$

$$\delta_1 = \left( \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I_{ij}^{опуз} - I_{ij})^2}{M \cdot N} \right)^{1/2}, \quad \delta_2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I_{ij}^{опуз} - I_{ij}^{восм})^2}{M \cdot N} \right)^{1/2}.$$

Для изображения, представленного на рисунке 4, значения среднеквадратической ошибки  $\delta_1$  и  $\delta_2$  равны 29,2 и 9,65 соответственно.

В таблице 1 представлены результаты оценки среднеквадратической ошибки в зависимости от угла направления периодических помех. Важно отметить, что при наклоне  $45^\circ$  периодический шум сильнее всего искажает изображение, однако при этом ошибка восстановления минимальна, так как все локальные максимумы находятся в середине амплитудного спектра. С другой стороны, при периодических помехах, расположенных вертикально и горизонтально, локальные максимумы расположены на горизонтальной и вертикальной осях, что делает фильтрацию более трудоемкой, так как простое обнуление значений может модифицировать полезные частоты и серьезно исказить низкочастотный сигнал.

Таблица 1. Среднеквадратическая ошибка восстановления изображения.

Угол наклона периодических помех	$\delta_1$	$\delta_2$
$10^\circ$	29,10	18,12
$15^\circ$	29,12	11,61
$30^\circ$	29,21	9,51
$45^\circ$	29,23	9,41
$60^\circ$	29,22	9,29
$75^\circ$	29,21	9,80
$80^\circ$	29,20	15,12

### Библиографический список

1. Гонзалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. - М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
2. Новиков, А. И., Пронькин А.В. Методы цифровой обработки изображений подстилающей поверхности. – М.: Горячая линия- Телеком, 2023. – 224 с.
3. Новиков, А. И. Сравнительный анализ методов фильтрации дискретного гауссовского шума при обработке изображений / А. И. Новиков, А. В. Пронькин // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2018. – № 66-1. – С. 70-77. – DOI 10.21667/1995-4565-2018-66-4-1-70-77.
4. Methods for Suppressing Discrete White Noise in Images / D. I. Ustyukov, A. V. Pronkin, E. R. Muratov, A. I. Novikov // 2020 9th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2020 : 9, Budva, 08–11 июня 2020 года. – Budva, 2020. – P. 9134131. – DOI 10.1109/MECO49872.2020.9134131.
5. Прэнт У. Цифровая обработка изображений. Пер. с англ. - М.: Мир, 1982. Кн.2. - 480 с.
6. Lee J.-S. Digital Image Smoothing and the Sigma Filter // Computer Vision, Graphics, Image Processing, 1983, vol. 24, no. 2. - Pp. 255–269.
7. Гусев В.Ю., Крапивенко А.В. Методика фильтрации периодических помех цифровых изображений // Электронный журнал «Труды МАИ», выпуск № 50. – С. 1-12.
8. Воропаева Н.В., Новиков С.Я., Федина М.Е. Дискретное преобразование Фурье в обработке сигналов. – Самара: Изд-во «Самарский университет», 2015. – 48 с.
9. Новиков А.И., Пронькин А.В., Шамин Н.О. Частотный метод фильтрации периодических помех цифровых изображений // Вестник РГРТУ. 2021, № 78. – С. 130-141. DOI: 10.21667/1995-4565-2021-78-130-141.
10. Souradeep Dutta, Arijit Mallick, Sourya Roy, Utkarsh Kumar. Periodic Noise Recognition and Elimination Using RFPCM Clustering // 2014 International Conference on Electronics and Communication Systems/ DOI: 10.1109/ECS.2014.689263.
11. Seniha Ketenci, Ali Gangal. Automatic reduction of Periodic Noise in Images using adaptive Gaussian Star Fielter // Turkish Journal of Electrical & Computer Sciences. 2017 25: 2336-2348. DOI: 10.3906/elk-1506-78
12. Anton Pronkin, Sergei Vityazev, Anatoly Novikov. Edge Detector Application in the Problem of Periodic Interference Filtering // 24th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA-2022). – pp. 1-6. DOI: 10.1109/DSPA533040/ 2022/ 9790763.
13. Новиков А.И., Пронькин А.В. Детектор границ градиентного типа для изображений подстилающей поверхности // Вестник РГРТУ. 2019, № 68. – С. 68-76. DOI: 10.21667/1995-4565-2019-68-2-68-76.

УДК 510.644; ГРНТИ 27.03.33

## ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЧЕТКИХ ЧИСЕЛ LR-ТИПА С НЕЧЕТКИМИ СПРЭДАМИ LR-ТИПА

К.В. Бухенский, А.Б. Дюбуа, А.Н. Конюхов

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, [chronos@bk.ru](mailto:chronos@bk.ru)

*Аннотация.* В последнее время для решения различных прикладных задач успешно применяются нечеткие множества второго типа (Type 2 FSs). Эти множества являются расширением нечетких множеств (FSs) в первичной трактовке L.Zadeh, в том смысле, что их элементы имеют не фиксированные, а нечеткие степени принадлежности. Несмотря на значительную гибкость, модель Type 2 FS в общем виде весьма сложна и, вероятно, избыточна для определенного класса задач. В статье предложен редуцированный вариант этой модели в виде нечетких чисел LR-типа со спрэдами, представленными также нечеткими числами LR-типа. Есть основания полагать, что применение таких чисел будет эффективным для построения модели полностью нечеткой регрессии.

*Ключевые слова:* нечеткое число LR-типа, нечеткие спрэды LR-типа,  $\alpha\beta\gamma$ -сечения.

## INVESTIGATION OF LR-TYPE FUZZY NUMBERS WITH LR-TYPE FUZZY SPREADS

K.V. Bukhensky, A.B. Dubois, A.N. Konyukhov

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, [chronos@bk.ru](mailto:chronos@bk.ru)

*The summary.* Since recently Type 2 Fuzzy Set (Type 2 FS) model is widely used as a powerful tool for trying various applied problems. Type 2 FSs can be considered as an extension of fuzzy sets, primarily introduced by L.Zadeh, with elements having not constant but fuzzy grades of membership. In spite of higher flexibility such a generalized model is complicated and might be exceeding with respect to some practical applications. This paper represents the reduced version of Type 2 FSs as LR-type fuzzy numbers (LR FNs) with fuzzy spreads being positive LR FNs. Proposed FNs are expected to be effective tool for the purposes of fully fuzzy regression modeling.

*Keywords:* LR-type fuzzy number, LR-type fuzzy spreads,  $\alpha\beta\gamma$ -cuts.

В теории нечетких множеств и ее приложениях применяются нечеткие числа (FNs) LR-типа с функцией принадлежности

$$\tilde{u}_{LR}(z) = \tilde{u}[m_1, m_2, ls, rs]_{LR}(z) = \begin{cases} L\left(\frac{m_1 - z}{ls}\right), & \text{если } m_1 - ls \leq z < m_1, \\ 1, & \text{если } m_1 \leq z \leq m_2, \\ R\left(\frac{z - m_2}{rs}\right), & \text{если } m_2 < z \leq m_2 + rs, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (1)$$

где  $z \in U$  – универсум элементов FN;

$m_1 \leq z \leq m_2$  – ядро FN;

$ls > 0$  и  $rs > 0$  – левый и правый спрэды FN;

$L(t), R(t) : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$  – левая и правая функции формы (SF), т.е. непрерывные убывающие функции, заданные на единичном отрезке, такие что  $R(0) = L(0) = 1$  и  $R(1) = L(1) = 0$  [1].

Если  $m_1 \neq m_2$  то полимодальное FN вида (1) часто называют нечетким интервалом.

Большой интерес в последнее время вызывают так называемые нечеткие множества «типа 2» (Type 2 FSs). Появление такой модели связано с тем, что во многих случаях весьма затруднительно задать конкретную степень принадлежности элемента универсума нечеткому множеству. Поэтому разумно, чтобы степень принадлежности также была нечетким множе-

ством на универсуме степеней принадлежности  $[0,1]$ . Приведем одно из определений Туре 2 FS. Множество пар

$$((x, \omega), \mu(x, \omega)), x \in X, \omega \in [0,1] \quad (2)$$

называется нечетким множеством второго типа [2].

Ниже рассматривается нечеткая модификация FS типа 2, а именно нечеткое число LR-типа с нечеткими спрэдами. Фаззификация параметров  $m_1, m_2$  не представляется необходимой, так как имеется возможность использовать полимодальный вариант  $m_1 \neq m_2$ . В то же время фаззификация спрэдов осуществляется по LR-типу.

Предлагаемое нечеткое множество имеет функцию принадлежности вида

$$\tilde{u}(z) = [m_1, m_2, \tilde{ls}, \tilde{rs}]_{L_0 R_0}(z) = \left[ m_1, m_2, [m_{1ls}, m_{2ls}, ls_{ls}, rs_{ls}]_{L_{ls} R_{ls}}, [m_{1rs}, m_{2rs}, ls_{rs}, rs_{rs}]_{L_{rs} R_{rs}} \right]_{L_0 R_0}(z), \quad (3)$$

где  $[m_{1ls}, m_{2ls}, ls_{ls}, rs_{ls}]_{L_{ls} R_{ls}}, [m_{1rs}, m_{2rs}, ls_{rs}, rs_{rs}]_{L_{rs} R_{rs}}$  – параметры левого и правого нечетких спрэдов соответственно: каждое является неотрицательным нечетким числом LR-типа, т.е. носители  $\text{supp } \tilde{ls}, \text{supp } \tilde{rs} \subset \mathbb{R}^+$ .

Левые и правые функции формы  $L, R$  в общем случае различные, но в основных выкладках остановимся на наиболее распространенном линейном варианте:

$$L_0(t) = R_0(t) = L_{ls}(t) = \dots = R_{rs}(t) = \begin{cases} 1-t, & 0 \leq t \leq 1 \\ 0, & t \notin [0,1] \end{cases}. \quad (4)$$

Очевидно, что нижняя и верхняя границы  $\alpha$ -сечений множества (3) являются нечеткими числами вида

$$\left( \underline{\tilde{u}} \right)_\alpha = \chi \{m_1\} \oplus \tilde{ls} \odot \chi \{-L_0^{-1}(\alpha)\}; \quad \left( \overline{\tilde{u}} \right)_\alpha = \chi \{m_2\} \oplus \tilde{rs} \odot \chi \{R_0^{-1}(\alpha)\}, \quad (5)$$

где  $\chi \{x\}$  – нечеткий синглтон, т.е. нечеткое множество, сечения которого постоянны  $(\chi \{x\})_\alpha = [x, x]$ . Знаки  $\oplus$  и  $\odot$  означают операции сложения и умножения FS соответственно в смысле принципа обобщения L.Zadeh [3]. При этом сечения нечетких спрэдов записываются как обычно; например,  $\beta$ -сечение левого спрэда есть промежуток

$$\left[ \left( \underline{\tilde{ls}} \right)_\beta, \left( \overline{\tilde{ls}} \right)_\beta \right]: \left( \underline{\tilde{ls}} \right)_\beta = m_{1ls} - ls_{ls} L_{ls}^{-1}(\beta), \quad \left( \overline{\tilde{ls}} \right)_\beta = m_{2ls} + rs_{ls} R_{ls}^{-1}(\beta), \quad 0 \leq \beta \leq 1, \quad (6)$$

и независимое от него  $\gamma$ -сечение правого спрэда:

$$\left[ \left( \underline{\tilde{rs}} \right)_\gamma, \left( \overline{\tilde{rs}} \right)_\gamma \right]: \left( \underline{\tilde{rs}} \right)_\gamma = m_{1rs} - ls_{rs} L_{rs}^{-1}(\gamma), \quad \left( \overline{\tilde{rs}} \right)_\gamma = m_{2rs} + rs_{rs} R_{rs}^{-1}(\gamma), \quad 0 \leq \gamma \leq 1. \quad (7)$$

Выполняя операции (5) при использовании  $\alpha$ -уровневого принципа обобщения Заде, получим семейства  $\alpha\beta$ - и  $\alpha\gamma$ -сечений  $\tilde{u}$  при  $0 \leq \alpha, \beta, \gamma \leq 1$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{\left( \widetilde{u} \right)_{\alpha}}_{\beta} = m_1 - \overline{\left( \widetilde{ls} \right)_{\beta}} L_0^{-1}(\alpha) = m_1 - (m_{2ls} + rs_{ls} R_{ls}^{-1}(\beta)) L_0^{-1}(\alpha) \\ \overline{\left( \widetilde{u} \right)_{\alpha}}_{\beta} = m_1 - \overline{\left( \widetilde{ls} \right)_{\beta}} L_0^{-1}(\alpha) = m_1 - (m_{1ls} - ls_{ls} L_{ls}^{-1}(\beta)) L_0^{-1}(\alpha) \\ \overline{\left( \widetilde{u} \right)_{\alpha}}_{\gamma} = m_2 + \overline{\left( \widetilde{rs} \right)_{\gamma}} R_0^{-1}(\alpha) = m_2 + (m_{1rs} - ls_{rs} L_{rs}^{-1}(\gamma)) R_0^{-1}(\alpha) \\ \overline{\left( \widetilde{u} \right)_{\alpha}}_{\gamma} = m_2 + \overline{\left( \widetilde{rs} \right)_{\gamma}} R_0^{-1}(\alpha) = m_2 + (m_{2rs} + rs_{rs} R_{rs}^{-1}(\gamma)) R_0^{-1}(\alpha) \end{array} \right. \quad (8)$$

где  $m_1, m_2 \in \mathbb{R} (m_1 \leq m_2)$ ;  $m_{1ls}, m_{2ls}, ls_{ls}, rs_{ls}, m_{1rs}, m_{2rs}, ls_{rs}, rs_{rs} \in \mathbb{R}^+ \cup \{0\}$ ;  $m_{1ls} \leq m_{2ls}$ ;  $m_{1rs} \leq m_{2rs}$ .

Для упрощения записей будем обозначать семейства сечений следующим образом:

$$\overline{\left( \widetilde{u} \right)_{\alpha}}_{\beta} = DD_{\alpha, \beta}; \quad \overline{\left( \widetilde{u} \right)_{\alpha}}_{\beta} = DU_{\alpha, \beta}; \quad \overline{\left( \widetilde{u} \right)_{\alpha}}_{\gamma} = UD_{\alpha, \gamma}; \quad \overline{\left( \widetilde{u} \right)_{\alpha}}_{\gamma} = UU_{\alpha, \gamma}, \quad (9)$$

где литера  $D$  обозначает нижнюю границу сечения,  $U$  – верхнюю; порядок перечисления сечений соответствует порядку следования индексов. Сечения (9) при фиксированных значениях  $\beta = \beta_0, \gamma = \gamma_0$ , например  $DD_{\alpha, \beta_0}$  или  $UD_{\alpha, \gamma_0}$  ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ), будем называть главными сечениями множества ( $\alpha$ -сечения). Сечения вида  $DU_{\alpha_0, \beta}$  ( $0 \leq \beta \leq 1$ ) или  $UU_{\alpha_0, \gamma}$  ( $0 \leq \gamma \leq 1$ ) при фиксированном  $\alpha = \alpha_0$ , будем называть второстепенными сечениями.

Выясним условия, при которых объединение сечений (9) образует нечеткое число, то есть выпуклое нечеткое множество. Это значит, что левые концы сечений должны быть убывающими функциями, а правые – невозрастающими функциями от переменных  $0 \leq \alpha, \beta, \gamma \leq 1$ .

Так для сечений семейства  $DD_{\alpha, \beta}$  очевидно, что условия

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial DD_{\alpha, \beta}}{\partial \alpha} = -(m_{2ls} + rs_{ls} R_{ls}^{-1}(\beta)) \frac{\partial L_0^{-1}(\alpha)}{\partial \alpha} \geq 0 \\ \frac{\partial DD_{\alpha, \beta}}{\partial \beta} = -rs_{ls} \frac{\partial R_{ls}^{-1}(\beta)}{\partial \beta} L_0^{-1}(\alpha) \geq 0 \end{array} \right. \quad (10)$$

выполняются при всех  $0 \leq \alpha, \beta, \gamma \leq 1$ . Действительно  $L_0^{-1}(\alpha), R_{ls}^{-1}(\beta)$  везде убывают (как функции формы), кроме того  $m_{2ls} + rs_{ls} R_{ls}^{-1}(\beta) \geq 0$ .

Аналогично можно показать выпуклость множества по сечениям семейства  $UU_{\alpha, \gamma}$ .

Для промежуточных сечений потребуется наложить дополнительные условия. Так, для семейства сечений  $DU_{\alpha, \beta}$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial DU_{\alpha, \beta}}{\partial \alpha} = -(m_{1ls} - ls_{ls} L_{ls}^{-1}(\beta)) \frac{\partial L_0^{-1}(\alpha)}{\partial \alpha} \\ \frac{\partial DU_{\alpha, \beta}}{\partial \beta} = \left( ls_{ls} \frac{\partial L_{ls}^{-1}(\beta)}{\partial \beta} \right) L_0^{-1}(\alpha) \end{array} \right. \quad (11)$$

должно выполняться  $\frac{\partial DU_{\alpha,\beta}}{\partial \alpha} \geq 0$  при всех  $0 \leq \alpha \leq 1$ . Для этого потребуем

$$m_{ls} - ls_{ls} L_{ls}^{-1}(\beta) \geq 0 \Leftrightarrow \beta \geq L\left(\frac{m_{ls}}{ls_{ls}}\right). \quad (12)$$

Если функция формы линейная, то из (12) получим

$$\beta \geq 1 - \frac{m_{ls}}{ls_{ls}}. \quad (13)$$

Из (11) следует, что  $\frac{\partial DU_{\alpha,\beta}}{\partial \beta} \leq 0$ , но в таком случае  $\frac{\partial DU_{\alpha,1-\beta}}{\partial \beta} \geq 0$  при всех  $0 \leq \alpha, \beta \leq 1$ .

Аналогичные расчеты несложно проделать для семейства сечений  $DU_{\alpha,\gamma}$ .

$$\begin{cases} \frac{\partial UD_{\alpha,\gamma}}{\partial \alpha} = (m_{rs} - ls_{rs} L_{rs}^{-1}(\gamma)) \frac{\partial R_0^{-1}(\alpha)}{\partial \alpha} \\ \frac{\partial UD_{\alpha,\gamma}}{\partial \gamma} = -ls_{rs} \frac{\partial L_{rs}^{-1}(\gamma)}{\partial \gamma} R_0^{-1}(\alpha). \end{cases} \quad (14)$$

Итак, получены условия выпуклости FS  $\tilde{u}$  (3) по главному сечению

$$\left(1 - \frac{m_{ls}}{ls_{ls}} \leq \beta \leq 1\right) \wedge \left(1 - \frac{m_{rs}}{ls_{rs}} \leq \gamma \leq 1\right). \quad (15)$$

Если потребовать

$$(m_{ls} \geq ls_{ls}) \wedge (m_{rs} \geq ls_{rs}), \quad (16)$$

то FS  $\tilde{u}(z)$  (3) будет выпуклое по главному сечению при любых  $0 \leq \alpha, \beta, \gamma \leq 1$ .

Для выпуклости по второстепенным сечениям достаточно, чтобы в сечениях типа  $DU$  и  $UD$   $\beta$  и  $\gamma$  изменялись в «противофазе» с  $\alpha$ , т.е.  $DU_{\alpha,1-\beta}$ ,  $UD_{\alpha,1-\gamma}$ .

Таким образом FS  $\tilde{u}$  (3) может быть представлено трехпараметрическим семейством  $\alpha\beta\gamma$ -сечений, каждое из которых выпуклое при всех  $0 \leq \alpha, \beta, \gamma \leq 1$ .

$$[m_1, m_2, \tilde{ls}, \tilde{rs}]_{LR} = \bigcup_{\alpha,\beta,\gamma} (DD_{\alpha,\beta}, DU_{\alpha,1-\beta}, UD_{\alpha,1-\gamma}, UU_{\alpha,\gamma}). \quad (17)$$

Нетрудно показать, что выполнение условий (16) влечет за собой  $DU_{\alpha,1-\beta} \leq UD_{\alpha,1-\gamma}$ .

Для последующего определения операций каждое  $\alpha\beta\gamma$ -сечение FS  $\tilde{u}$  (3) удобно представить в виде упорядоченной матрицы:

$$(\tilde{u})_{\alpha,\beta,\gamma} = \begin{pmatrix} DD_{\alpha,\beta} & DU_{\alpha,1-\beta} \\ UU_{\alpha,\gamma} & UD_{\alpha,1-\gamma} \end{pmatrix}, \quad DD_{\alpha,\beta} \leq DU_{\alpha,1-\beta} \leq UD_{\alpha,1-\gamma} \leq UU_{\alpha,\gamma}. \quad (18)$$

Операцию сложения двух FSs типа (3) определим через сечения как

$$([m_1, m_2, \tilde{ls}, \tilde{rs}]_{LR} \oplus [m'_1, m'_2, \tilde{ls}', \tilde{rs}']_{LR})_{\alpha,\beta,\gamma} \stackrel{def}{=} \begin{pmatrix} DD_{\alpha,\beta} + DD'_{\alpha,\beta} & DU_{\alpha,1-\beta} + DU'_{\alpha,1-\beta} \\ UU_{\alpha,\gamma} + UU'_{\alpha,\gamma} & UD_{\alpha,1-\gamma} + UD'_{\alpha,1-\gamma} \end{pmatrix}. \quad (19)$$



Операция умножения на действительный ненулевой скаляр  $\lambda$ , представленный в виде нечеткого синглтона, может быть задана следующим образом:

$$\left([m_1, m_2, \tilde{l}s, \tilde{r}s]_{LR} \otimes \chi\{\lambda\}\right)_{\alpha\beta\gamma} = \lambda \cdot \begin{pmatrix} \theta(\lambda) & \theta(-\lambda) \\ \theta(-\lambda) & \theta(\lambda) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} DD_{\alpha,\beta} & DU_{\alpha,1-\beta} \\ UU_{\alpha,\gamma} & UD_{\alpha,1-\gamma} \end{pmatrix}, \quad (20)$$

где  $\theta(\lambda)$  - функция Хэвисайда.

**Пример.** Пусть  $\tilde{y}(z) = [3, 3, [1, 2, 1, 0.5]_{FF}, [2, 3, 1, 1.5]_{FF}]_{FF}(z)$ ,  $F = 1 - t$ . То есть все функции формы (правые и левые) линейные. В таком случае матрица  $\alpha\beta\gamma$ -сечений будет иметь вид

$$\begin{pmatrix} DD_{\alpha,\beta} & DU_{\alpha,1-\beta} \\ UU_{\alpha,\gamma} & UD_{\alpha,1-\gamma} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 - (1 - \alpha)(2.5 - 0.5\beta) & 3 - (1 - \alpha)(1 - \beta) \\ 3 + (1 - \alpha)(4.5 - 1.5\gamma) & 3 + (1 - \alpha)(2 - \gamma) \end{pmatrix}.$$

Главные согласованные сечения, т.е.  $\alpha\alpha$ -сечения изображены на рис. А. Умножим данное число на -0.5 и изобразим результат на рисунке б.

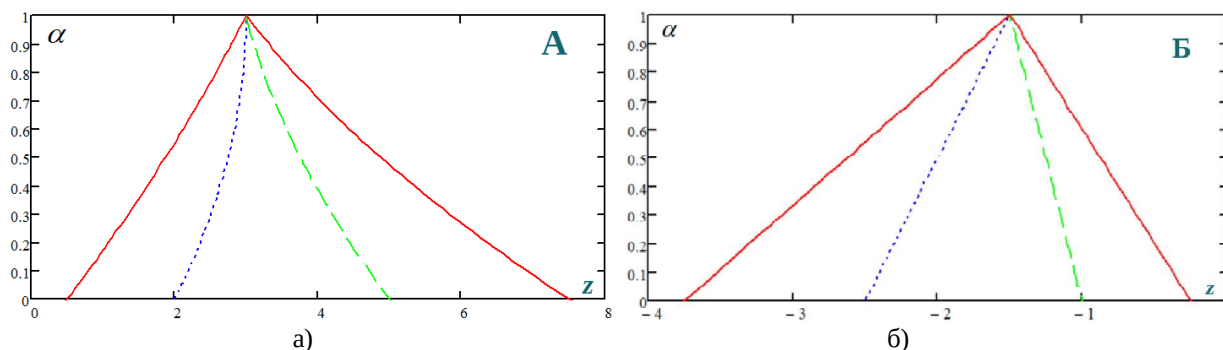


Рис.  $\alpha\alpha$ -сечения FS из примера (а) и результат умножения FS на -0.5 (б)

## Вывод

Обоснован подход к фаззификации спрэдов FS LR-типа по LR-типу. Исследованы свойства сечений нечетких чисел LR-типа с нечеткими спрэдами LR-типа и предложена форма их записи в виде совокупности матриц  $\alpha\beta\gamma$  – сечений. Формализованы в матричном виде операции сложения чисел и умножения на действительное ненулевое число. Задача последующих исследований – ввести и обосновать нелинейные операции над такими числами через матрицы  $\alpha\beta\gamma$  – сечений (умножение двух чисел и дефаззификация к типу 1). Предварительные исследования дают основания полагать, что рассматриваемые числа могут быть эффективными при моделировании полностью нечеткой регрессии [4].

## Библиографический список

1. Основы теории нечетких множеств. Часть 2: учеб. пособие / А.Н.Конюхов, А.Б.Дюбуа, А.С.Сафошкин; Рязан. гос. радиотехн. ун-т. Рязань, 2018. – 108 с.
2. Шведов А.С. О нечетких множествах типа 2 и нечетких системах типа 2, Итоги науки и техн. Сер. Современ. мат. и ее прил. Темат. обз., 2019, том 165, 114–122.
3. Bede B. Mathematics of Fuzzy Sets and Fuzzy Logic. – London: Springer, 2013. – 276 p.
4. Бухенский К.В., Конюхов А.Н., Дюбуа А.Б., Попова Д.О., Семина С.С. Коррекция неадекватных МНК-оценок коэффициентов полностью нечеткой регрессии на основе преобразований поворота // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2023. № 84. С. 143-156.

УДК 338.27; ГРНТИ 06.35

## ПРОГНОЗ РЕГРЕССИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПО ДАННЫМ ЦФО

А.С. Ершова

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, [ershovaasay@gmail.ru](mailto:ershovaasay@gmail.ru)

*Аннотация.* В работе рассматривается комплексный анализ зависимости уровня бедности от доходов в регионах Центрального Федерального Округа (ЦФО) России за период с 2016 по 2021 год. Используя данные о доходах и уровне бедности, были построены регрессионные модели для каждого года наблюдения с последующим анализом трендов параметров этих моделей. На основе выявленных трендов выполнено прогнозирование параметров регрессионных моделей на один год вперед, что позволило сформировать прогнозные регрессионные зависимости. Для оценки точности и надежности полученных прогнозов были рассчитаны доверительные интервалы. Результаты исследования подчеркивают значимость аналитических методов в планировании социально-экономической политики и предоставляют данные для разработки мер по снижению уровня бедности в регионах ЦФО.

*Ключевые слова:* регрессионный анализ, уровень бедности, доходы населения, прогнозирование, доверительные интервалы, тренды.

## FORECASTING REGRESSION DEPENDENCIES BASED ON DATA FROM THE CENTRAL FEDERAL DISTRICT

A.S. Ershova

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, [ershovaasay@gmail.ru](mailto:ershovaasay@gmail.ru)

*Abstract.* This paper presents a comprehensive analysis of the dependency between poverty levels and incomes in the regions of the Central Federal District (CFD) of Russia for the period from 2016 to 2021. Using data on incomes and poverty levels, regression models were constructed for each year of observation, followed by an analysis of the trends in these models' parameters. Based on the identified trends, the parameters of the regression models were forecasted for one year ahead, allowing the formation of predictive regression dependencies. To assess the accuracy and reliability of the obtained forecasts, confidence intervals were calculated. The results of the study highlight the significance of analytical methods in planning socio-economic policy and provide data for the development of measures to reduce poverty levels in the regions of the CFD.

*Keywords:* regression analysis, poverty level, population income, forecasting, confidence intervals, trends.

В современном социально-экономическом анализе большое значение приобретает изучение и прогнозирование взаимосвязей между различными экономическими показателями. Одной из ключевых задач является анализ связи между доходами населения и уровнем бедности, что позволяет разработать эффективные меры социальной поддержки и экономического стимулирования.

Применение регрессионного анализа позволяет не только оценить текущее состояние данных социально-экономических показателей, но и выстроить прогноз на будущее. В работе происходит построение регрессионных моделей для каждого года наблюдения, что дает возможность не только анализировать изменения в динамике, но и выявлять тренды в развитии экономических показателей регионов ЦФО. Основываясь на параметрах построенных моделей, осуществляется прогнозирование регрессионных зависимостей на последующий год, что позволяет оценить, а впоследствии планировать экономическую деятельность.

Ключевым преимуществом применения регрессионного анализа является его гибкость и способность адаптироваться к различным типам данных, что делает его незаменимым инструментом в экономическом прогнозировании. Однако следует учитывать, что точность прогнозов сильно зависит от качества исходных данных и корректности выбранной модели. В работе предлагается включить в регрессионные модели время, что позволяет увеличить объем выборки и за счет этого решить проблему малых выборок, а также дает возможность прогнозирования моделей.

Таким образом, целью данной статьи является не только анализ зависимости уровня бедности от доходов в ЦФО, но и разработка методологии прогнозирования будущих тенденций на основе регрессионных моделей. Исследование стремится внести вклад в разработку эффективных стратегий социально-экономической политики на региональном уровне.

Для анализа зависимости между доходами и уровнем бедности применяется линейная регрессия. Простейшая однофакторная линейная регрессионная зависимость  $y$  от  $x$  [3] есть:

$$y = a_0 + a_1 x \quad (1)$$

где  $a_0$  – свободный член,  $a_1$  – коэффициент наклона. Данные параметры находятся методом наименьших квадратов (МНК) на основе выборки измерений  $(x_i, y_i)$ ,  $i = \overline{1, n}$ , и вектор оценок параметров в векторной форме будет иметь следующий вид [1]:

$$A = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (2)$$

где  $T$  – символ транспонирования;  $Y = (y_1 y_2 \dots y_n)^T$  –  $n$ -вектор-столбец;  $A = (a_0 \ a_1)^T$ ;

$X$  –  $n \times 2$ -матрица.

В данной работе регрессионные модели строятся отдельно для каждого года наблюдения  $t_k$ ,  $k = \overline{1, m}$ , что позволяет оценить динамику изменения параметров модели во времени. Для каждого года рассчитываются параметры регрессии  $a_0$  и  $a_1$  отражающий степень влияния доходов на уровень бедности. На основе этих параметров для каждого года анализа создаются тренды, позволяющие прогнозировать изменение коэффициентов в будущем.

С использованием линейной регрессии по параметрам моделей прошлых лет прогнозируются значения коэффициентов на ближайшие годы. Эти прогнозы позволяют сформировать представление о будущем уровне бедности в зависимости от доходов.

Найденные по  $k$ -м годам параметры  $a_{0k}$  и  $a_{1k}$   $k = \overline{1, m}$  подлежат сглаживанию с помощью линейной трендовой модели. Таким образом, для каждого коэффициента строится собственная модель тренда [2]:

$$a_0^*(k) = b_{00} + b_{10}(k-1), \quad a_1^*(k) = b_{01} + b_{11}(k-1), \quad k = \overline{1, 2, \dots, m}, \quad (3)$$

и для данных моделей оцениваются векторы параметров:  $B = (b_{00} \ b_{10})^T$  – свободные члены,

$B = (b_{01} \ b_{11})^T$  – коэффициенты наклона [2] по формуле:

$$\hat{B} = (F^T F)^{-1} F^T A, \quad (4)$$

где  $A = (a_{01} a_{02} \dots a_{0m})^T$  или  $A = (a_{11} a_{12} \dots a_{1m})^T$ ,  $F$  –  $m \times 2$ -матрица вида

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 & \dots & 1 \\ 0 & 1 & \dots & i-1 & \dots & m-1 \end{bmatrix}^T.$$

На основе прогнозируемых коэффициентов строится прогнозная регрессионная модель, которая позволяет оценить ожидаемый уровень бедности в зависимости от доходов населения на ближайшие годы.

Для оценки неопределенности и достоверности прогнозов также рассчитываются доверительные интервалы для ожидаемого уровня бедности. Это позволяет оценить диапазон возможных значений прогнозируемых показателей с заданным уровнем вероятности (например, 95%).

Доверительный интервал для измерений берется относительно модельных значений и находится для каждого  $k$  - го момента времени ( $k = \overline{1, m}$ ) [2]:

$$\hat{y} \pm \gamma \cdot s_{cp}, \quad (5)$$

где коэффициент  $\gamma$  определяется правилом нескольких сигма или с учетом более строго критерия Стьюдента для заданной доверительной вероятности [1], а  $s_{cp}$ , - усредненное по  $k$  выборочное СКО, найденное по следующим формулам [2]:

$$s_{cp} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m s_k, \quad (6)$$

$$s_k = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{ki} - \hat{y}_{ki})^2}, \quad (7)$$

где  $y_{ki}$  – это фактические значения зависимой переменной, а  $\hat{y}_{ki}$  – это значения регрессионной модели.

При построении доверительного интервала для будущего измерения к дисперсии ошибки прогноза  $D_N$  прибавляется дисперсия ошибки измерения. Величину  $D_N$  можно рассчитать [1] по следующей формуле:

$$y = b_0 + b_1 k, \quad k = \overline{1, m}, \quad (8)$$

где  $b_0$  и  $b_1$  – МНК-коэффициенты найденные по формуле [1]:

$$D_N = s_{cp}^2 h_N^T (H_m^T H_m)^{-1} h_N, \quad N > m, \quad (9)$$

где  $s_{cp}^2$  – выборочная усредненная дисперсия ошибок измерения,  $H_m = (h_1^T h_2^T \dots h_m^T)^T$  - матрица размером  $m \times 2$ , в которой  $k$ -я строка:  $h_k^T = (1 \ k)$ ,  $h_N^T = (1 \ N)$ .

Исходя из вышесказанного, доверительный интервал прогноза (5) будет иметь вид:

$$\hat{y} \pm \gamma \cdot s_{cp} \sqrt{1 + h_N^T (H_m^T H_m)^{-1} h_N}, \quad (10)$$

Коэффициент детерминации  $R^2$  является центральным показателем в регрессионном анализе, который показывает уровень соответствия между прогнозируемыми значениями, полученными с помощью модели, и фактическими наблюдаемыми данными. В более широком смысле,  $R^2$  дает представление о том, насколько хорошо независимые переменные объясняют вариацию зависимой переменной. Формула для вычисления коэффициента детерминации задается следующим образом [3]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (11)$$

где  $y_i$  – это фактические значения зависимой переменной,  $\hat{y}_i$  – это значения регрессионной модели, а  $\bar{y}$  – среднее значение фактических значений зависимой переменной.

Значение  $R^2$  варьируется от 0 до 1, где 0 указывает на отсутствие корреляции между предсказанными и фактическими значениями, в то время как значение 1 означает, что модель идеально предсказывает зависимую переменную. В контексте исследования  $R^2$  оценивает, насколько хорошо доходы населения могут предсказать уровень бедности в различных регионах.

Такой подход к прогнозированию трендов на основе регрессионного анализа обладает рядом преимуществ, включая способность модели адаптироваться к изменениям в данных и предоставлять количественные оценки будущих тенденций. Однако следует учитывать потенциальные ограничения, связанные с предположениями линейности трендов и влиянием

внешних факторов, которые могут вызвать отклонения реальных данных от прогнозируемых моделей.

Для исследования были собраны данные о средних доходах ( $x$ ) на одного человека в месяц в рублях и уровне бедности ( $y$ ) в процентах из официальных источников по 16 субъектам ЦФО РФ за 2016 -2020 годы, представленные в таблице 1:

Таблица 1. Средний доход и доля бедных

Субъекты ЦФО	2016 год		2017 год		2018 год		2019 год		2020 год		2021 год	
	Ср. доход	Доля бедных	Ср. доход	Доля бедных	Ср. доход	Доля бедных	Ср. доход	Доля бедных	Ср. доход	Доля бедных	Ср. доход	Доля бедных
Белгор. обл.	29 799	8,1	30 342	7,8	30 778	7,5	32 352	7,8	32 835	7,2	35 612	7,00
Брянск. обл.	24 006	14,4	25 107	14,2	26 585	13,6	28 371	13,8	28 310	13,6	31 608	13,00
Владим. обл.	22 365	14,6	23 554	13,2	23 539	13,1	25 358	12,6	25 803	12,5	28 523	11,80
Воронеж. обл.	29 284	9,4	29 498	9,0	30 289	8,9	32 022	8,9	31 997	8,5	35 198	7,90
Иванов. обл.	23 676	14,9	24 860	14,3	24 503	14,7	25 794	14,2	26 219	13,7	28 680	12,90
Калуж. обл.	28 800	10,3	28 715	10,0	29 129	10,4	31 394	10,2	32 183	9,7	35 076	8,90
Костром. обл.	23 174	13,7	24 093	13,4	23 716	12,7	25 285	12,6	25 260	12,5	28 560	11,80
Курск. обл.	25 355	10,5	26 112	10,3	27 275	9,9	29 149	9,9	29 671	9,9	32 715	9,10
Липецк. обл.	27 934	9,2	28 956	8,8	30 010	8,7	32 479	8,6	32 201	8,4	35 231	8,10
Орлов. обл.	23 006	14,2	23 979	13,9	24 895	13,5	26 064	13,6	26 705	12,9	29 846	12,10
Рязан. обл.	23 799	12,8	24 272	13,3	25 441	13,0	26 886	12,7	27 248	12,8	30 496	12,40
Смолен. обл.	23 614	17,8	24 766	16,9	25 888	16,4	27 388	16,3	27 998	15,6	30 731	14,30
Тамбов. обл.	25 769	10,6	26 058	10,4	26 828	9,8	28 154	10,7	27 771	10,8	30 241	10,50
Тверск. обл.	24 063	12,8	24 353	12,4	25 125	12,2	27 211	11,7	27 530	11,4	30 675	10,80
Тульск. обл.	26 815	10,0	27 226	9,9	27 208	10,0	28 557	10,3	29 208	10,1	32 252	9,70
Яросл. обл.	26 768	11,0	27 200	10,7	27 055	10,2	28 658	10,3	29 475	9,9	33 131	8,90

Для каждого года с 2016 по 2020 годы были построены линейные регрессионные модели. В процессе анализа были рассчитаны коэффициенты регрессионных уравнений, которые отражают влияние дохода на уровень бедности.

На основании данных за 2016 – 2010 годы находятся ежегодные уравнения регрессии. На рисунках 1 – 5 показано наложение линии на корреляционное поле, построенное по данным 2016 – 2020 года соответственно, а также построен доверительный интервал (95 %) для выходной переменной  $y$  (уровня бедности).

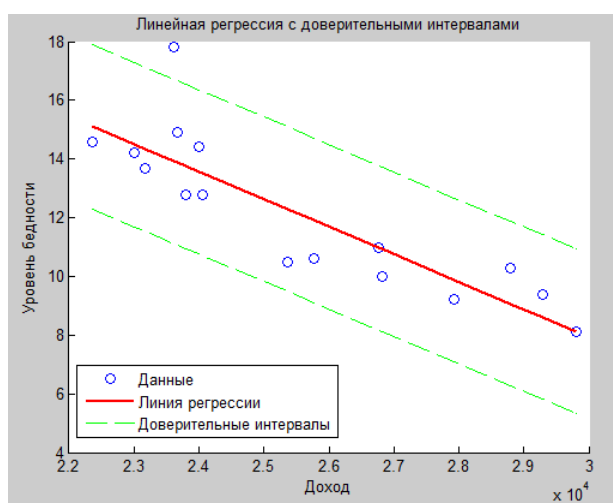


Рис. 1. Результаты регрессионного анализа за 2016 г.

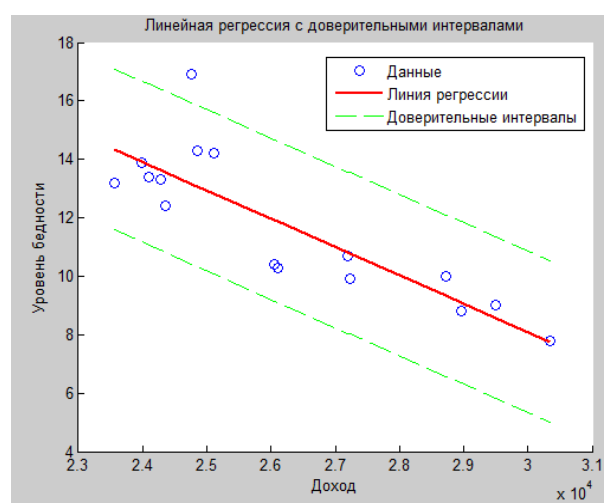


Рис. 2. Результаты регрессионного анализа за 2017 г.

Уравнение регрессии за 2016 год:  $\hat{y} = 36,063 - 0,000937x$ .

$R^2 = 0,7402$  – 74,02 % вариации уровня бедности может быть объяснено изменениями в доходах населения в 2016 году.

Уравнение регрессии за 2017 год:  $\hat{y} = 37,166 - 0,00097x$ .

$R^2 = 0,7202$  – 72,02 % вариации уровня бедности может быть объяснено изменениями в доходах населения в 2017 году.

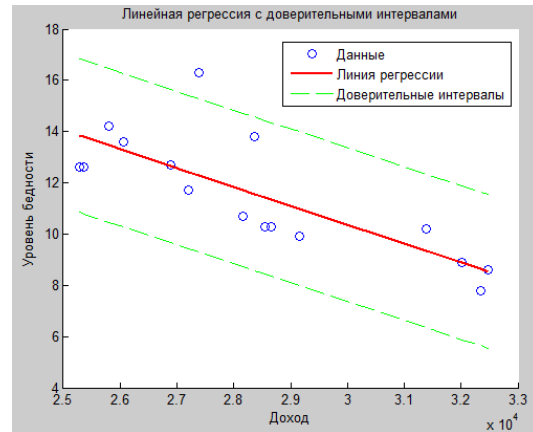
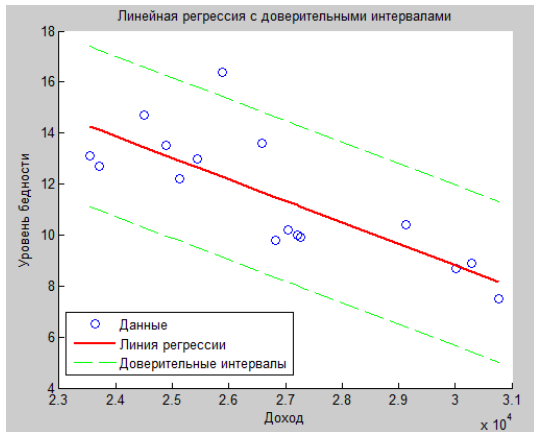


Рис. 1. Результаты регрессионного анализа за 2018 г. Рис. 2. Результаты регрессионного анализа за 2019 г.

Уравнение регрессии за 2018 год:  $\hat{y} = 34,133 - 0,00084x$ .

$R^2 = 0,6195$  – 61,95 % вариации уровня бедности может быть объяснено изменениями в доходах населения в 2018 году.

Уравнение регрессии за 2019 год:  $\hat{y} = 32,454 - 0,000736x$ .

$R^2 = 0,6120$  – 61,2 % вариации уровня бедности может быть объяснено изменениями в доходах населения в 2019 году.

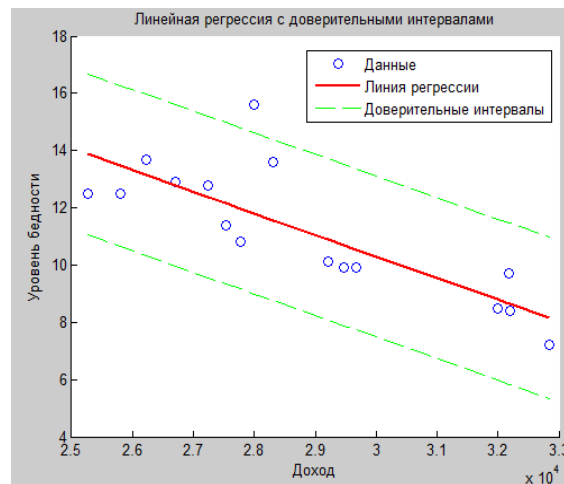


Рис. 5. Результаты регрессионного анализа за 2020 год

Уравнение регрессии за 2020 год:  $\hat{y} = 32,898 - 0,000753x$ .

$R^2 = 0,6476$  – 64,76 % вариации уровня бедности может быть объяснено изменениями в доходах населения в 2020 году.

Из полученных коэффициентов уравнений формируются временные ряды с линейными трендами. Для коэффициента  $a_0$  будет следующий линейный тренд:

$$\hat{a}_0 = 36,7511 - 1,1041(k - 1), \quad k = \overline{1,5}$$

для коэффициента  $a_1$  :

$$\hat{a}_1 = -0,000968 + 0,00006(k - 1), \quad k = \overline{1,5}.$$

Данные за 2021 год выступают в качестве тестирования полученной модели. Для выбранного периода это будет шестой год, исходя из этого осуществляется прогноз коэффициентов  $\hat{a}_0$  и  $\hat{a}_1$ , а также формируется прогнозное уравнение регрессии для 2021 год:

$$\hat{y} = 31,2304 - 0,0006674x.$$

Прогнозирование доверительного интервала также происходит через использование модели временных рядов. Результаты прогнозирования, а также результаты по реальным данным отображены на рисунке 7.

Коэффициент детерминации прогнозируемой регрессионной модели  $R^2 = 0,6045$ .

Коэффициент детерминации фактической регрессионной модели  $R^2 = 0,6826$ . То есть 60,45% вариации уровня бедности может быть объяснено изменениями в доходах населения в 2021 году по прогнозной модели, в то время как фактически это значение составляет 68,26%.

Визуальный анализ показывает, что прогнозная линия регрессии (соответственно и прогнозные доверительные интервалы) располагается ниже фактической линии регрессии (фактических доверительных интервалов). Различия между реальной и прогнозируемой моделями могут отражать эффекты экономической или социальной политики, внедренной в промежуточном периоде.

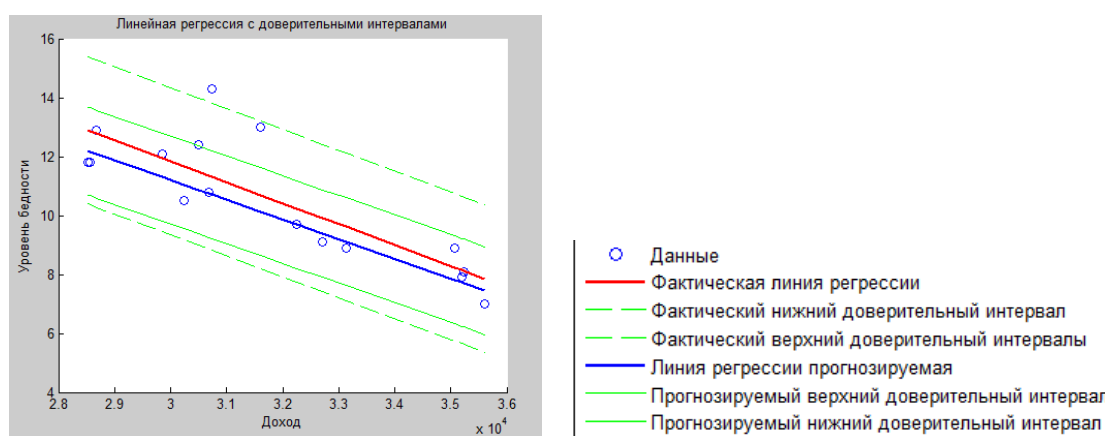


Рис. 7. Результаты на 2021 год

На основе проделанной работы можно сформулировать следующие выводы:

1. Исследование показало, что есть статистически значимая связь между доходами населения и уровнем бедности в регионах ЦФО. Эта взаимосвязь сохранилась на протяжении анализируемого периода времени.

2. Прогнозные модели указывают на потенциальные тенденции в отношениях доходов и бедности. Эти модели могут служить инструментом для разработки экономической политики и планирования социальных программ.

3. Расчет доверительных интервалов выявил диапазон ожидаемых значений, подчеркнув значительную неопределенность в прогнозах, что важно для разработки социальной политики и планирования.

4. Коэффициент детерминации был рассчитан для каждого года в период с 2016 по 2021 годы, что позволило оценить стабильность взаимосвязи между доходами и уровнем

бедности во времени и предоставило ключевое понимание для разработки социальной политики и планирования социальных программ.

5. Поскольку социально-экономические процессы подвержены влиянию множества факторов, включая глобальные экономические тенденции, политические изменения и неожиданные события (например, пандемии или финансовые кризисы), необходимо регулярно обновлять модели и прогнозы, чтобы отразить последние данные и тренды.

6. Предложения, основанные на анализе, должны быть направлены на устранение причин бедности и на повышение доходов в наиболее уязвимых регионах. Прогнозы могут быть использованы для определения регионов с наибольшей потребностью в инвестициях и социальной поддержке.

6. Результаты исследования подчеркивают необходимость дальнейших подробных анализов, которые могли бы включать другие переменные, такие как уровень образования, занятость, демографические изменения и доступ к социальным услугам, чтобы лучше понять и предсказать изменения в уровне бедности.

В заключение, данная работа предоставила данные и прогнозы, которые могут служить основой для информированного принятия решений в области экономической и социальной политики.

### Библиографический список

1. Модели неопределенности в теории и приложениях: учеб. пособие / В. К. Клочко. М.: КУРС.2022 204 с.
2. Клочко В. К., Кузнецов В. П., В. К. Моделирование временных регрессионных зависимостей и их приложение к анализу уровня жизни населения // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2023 № 83 С. 112-119.
3. Мелас В.Б., Шпилев П.В., Планирование и анализ для регрессионных моделей: Учеб. пособие. — СПб., 2014 - 98 с.

УДК 517.98; ГРНТИ 378.147

## КОМПЬЮТЕРНЫЙ МЕТОД ПОИСКА ПСЕВДОРЕШЕНИЙ НЕСОВМЕСТИМЫХ СИСТЕМ ЛИНЕЙНЫХ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ

С.А. Нелюхин

*Рязанский государственный радиотехнический университет  
Россия, Рязань, sergey-nel@yandex.ru*

*Аннотация.* В работе на основе метода наименьших квадратов рассмотрено нахождение псевдорешения несовместной СЛАУ на основе равенства невязок. Показано применение приведенного метода к нахождению псевдорешения СЛАУ в системе компьютерной математики Maple.

*Ключевые слова:* метод наименьших квадратов, несовместная система, псевдорешение, норма невязки, система компьютерной математики Maple.

## COMPUTER METHOD OF SEARCHING FOR PSEUDO-SOLUTIONS OF INCOMPATIBLE SYSTEMS LINEAR ALGEBRAIC EQUATIONS BASED ON THE LEAST SQUARES METHOD

S.A. Nelukhin

*Ryazan State Radio Engineering University  
Russia, Ryazan, sergey-nel@yandex.ru*

*Abstract.* In the paper, based on the least squares method, the finding of a pseudo-solution of a non-joint SLA based on the equality of residuals is considered. The application of the above method to finding the pseudo-solution of SLOUGH in the Maple computer mathematics system is shown.

*Keywords:* least squares method, incompatible system, pseudo-solution, norm of discrepancy, Maple computer mathematics system



**1. Постановка задачи.** Задача исследования несовместных СЛАУ с целью нахождения их “приближенных решений” возникает во многих приложениях, связанных с обработкой и информационным анализом экспериментальных данных (анализ временных рядов, параметрическая идентификация линейных зависимостей, оптимальное управление).

Рассмотрим несовместную СЛАУ

$$A\bar{x} = A_0, \quad (1)$$

где  $A = (a_{ij})$  – основная матрица (1) ( $a_{ij} \in \mathbf{R}$ ,  $i = \overline{1, m}$ ,  $j = \overline{1, n}$ ),  $A_0 = (a_{10} \ a_{20} \ \dots \ a_{m0})^T$ , ( $a_{i0} \in \mathbf{R}$ ,  $i = \overline{1, m}$ ),  $\bar{x} = (x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n)^T$  – вектор-столбец неизвестных.

К решению задачи по нахождению “приближенных решений” СЛАУ (1) традиционно применяют метод наименьших квадратов (МНК). Для значений переменных  $x_1, x_2, \dots, x_n$  составляется вектор невязки  $\bar{d} = A\bar{x} - A_0$ . Ставится задача – найти набор  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , который приводит к минимизации функционала:

$$f(\bar{x}) = \|A\bar{x} - A_0\|^2 \equiv (A\bar{x} - A_0)^T (A\bar{x} - A_0) \rightarrow \min \quad (2)$$

При этом  $\bar{x}^{(0)} \in \mathbf{R}^n$ , при котором (2) принимает наименьшее значение, называется **псевдорешением** СЛАУ (1). То есть классически псевдорешением СЛАУ (1) называется такой вектор-столбец, который минимизирует норму вектора невязки. Как доказано в [1], система (1) может иметь бесконечное множество псевдорешений.

Альтернативный подход к исследованию несовместных СЛАУ заключается в построении для данной СЛАУ регуляризующего алгоритма [1,2,3], который позволяет получить некоторое псевдорешение системы, минимизирующее норму невязки. В качестве дополнительного условия используется близость к некоторому вектору  $\tilde{x}_0 \in \mathbf{R}^n$ :

$$f(\bar{x}) = (A\bar{x} - A_0)^T \cdot (A\bar{x} - A_0) + \lambda (\bar{x} - \tilde{x}_0)^T \cdot (\bar{x} - \tilde{x}_0) \rightarrow \min,$$

где  $\lambda \in \mathbf{R}$  – параметр регуляризации. Решение (3) называют **нормальным псевдорешением**. Доказывается, что нормальное псевдорешение удовлетворяет системе уравнений

$$(A^T A + \lambda E)\bar{x} = A^T A_0 + \lambda \tilde{x}_0.$$

Если параметр регуляризации подобрать так, что матрица  $A^T A + \lambda E$  будет неособенной, то единственное нормальное псевдорешение будет иметь вид

$$\bar{x}^{(0)} = (A^T A + \lambda E)^{-1} \cdot (A^T A_0 + \lambda \tilde{x}_0).$$

Псевдорешение несовместной СЛАУ можно найти при помощи так называемой псевдообратной матрицы  $A^+$  [4]. При этом псевдорешение СЛАУ (1) удовлетворяет векторному равенству  $\bar{x} = A^+ \cdot A_0$ .

В работе [5] рассматривается метод построения псевдорешения СЛАУ (1) при помощи разложения пространства  $\mathbf{R}^n$  в прямую сумму двух подпространств:

$$\mathbf{R}^n = \mathbf{L}_A^0 \oplus \text{Span}(\bar{b}_1, \bar{b}_2, \dots, \bar{b}_m),$$

где  $\mathbf{L}_A^0 = \{\bar{x} \in \mathbf{R}^n : A\bar{x} = \bar{0}_m\}$  – нуль-пространство  $A$ ,  $\text{Span}(\bar{b}_1, \bar{b}_2, \dots, \bar{b}_m)$  – подпространство, порожденное вектор-столбцами  $A^T$ ,  $\bar{b}_i$  –  $i$ -ый столбец матрицы  $A^T$  ( $i = \overline{1, m}$ )

В работе [6] на основе обобщенного метода наименьших квадратов проводится матричная коррекция несовместных СЛАУ.

**2. Нахождение псевдорешения методом равенства невязок.** Рассмотрим далее переопределенную ( $m > n$ ), несовместную СЛАУ вида (1). Для каждого набора переменных  $\bar{x} \in \mathbf{R}^n$  введем невязки  $z_k = a_{k1}x_1 + a_{k2}x_2 + \dots + a_{kn}x_n - a_{k0}$  ( $k = \overline{1, m}$ ).

Ввиду несовместности СЛАУ (1) найдется номер  $k \in \{1, 2, \dots, m\}$ , при котором невязка  $z_k \neq 0$ . Требуется найти такой вектор-столбец  $\bar{x} \in \mathbf{R}^n$ , при котором наибольшая из невязок  $z_k$  принимает наименьшее значение. Очевидно, что в самом простом случае, достаточно минимизировать невязки  $z_k$  ( $k = \overline{1, m}$ ), при которых все они равны между собой, то есть  $z_k = z_l$  (при всех  $k, l \in \{1, 2, \dots, m\}$ ), или все равно, что (принято  $x_0 = -1$ )

$$z_k - z_l = \sum_{j=0}^n (a_{kj} - a_{lj})x_j = 0, \quad k, l \in \{1, 2, \dots, m\}. \quad (3)$$

Для решения задачи введем минимизирующий функционал

$$F(\bar{x}) = \sum_{k=1}^{m-1} \sum_{l>k}^m \left\{ \sum_{j=0}^n (a_{kj} - a_{lj})x_j \right\}^2 \rightarrow \min. \quad (4)$$

Требуется найти такой вектор-столбец  $\bar{x} \in \mathbf{R}^n$ , при котором выполняются равенства (3), и функционал (4) принимает наименьшее значение.

Минимизируя функционал (4), приходим к СЛАУ относительно  $\bar{x} \in \mathbf{R}^n$ :

$$\frac{\partial F(\bar{x})}{\partial x_s} \equiv \sum_{k=1}^{m-1} \sum_{l>k}^m \left\{ \sum_{j=0}^n (a_{kj} - a_{lj})x_j \right\} \cdot (a_{ks} - a_{ls}) = 0 \quad (s = \overline{1, n}). \quad (5)$$

Введем следующие обозначения:  $u = (x_0 \quad x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_n)^T$ ,

$A^{(i,j)} = (a_{i0} - a_{j0} \quad a_{i1} - a_{j1} \quad a_{i2} - a_{j2} \quad \dots \quad a_{in} - a_{jn})^T$ ,  $i, j \in \{1, 2, \dots, m\}$ ,  $i < j$ . Тогда функционал (4) и система (5) запишутся в виде

$$\begin{cases} F(\bar{x}) = \sum_{k=1}^{m-1} \sum_{l>k}^m \left\{ A^{(k,l)} u \right\}^2 \rightarrow \min, \\ \frac{\partial F(\bar{x})}{\partial x_s} \equiv \sum_{k=1}^{m-1} \sum_{l>k}^m \left\{ A^{(k,l)} u \right\} \cdot (a_{ks} - a_{ls}) = 0, \quad s = \overline{1, n}. \end{cases} \quad (6)$$

Система (6) в развернутом виде примет вид

$$\begin{cases} F(\bar{x}) = \sum_{k=1}^{m-1} \sum_{l>k}^m \left\{ A^{(k,l)} u \right\}^2 \rightarrow \min, \quad \frac{\partial F(x)}{\partial x_1} \equiv \sum_{k=1}^{m-1} \sum_{l>k}^m \left\{ A^{(k,l)} \cdot (a_{k1} - a_{l1}) \right\} u = 0, \\ \frac{\partial F(x)}{\partial x_2} \equiv \sum_{k=1}^{m-1} \sum_{l>k}^m \left\{ A^{(k,l)} \cdot (a_{k2} - a_{l2}) \right\} u = 0, \dots, \quad \frac{\partial F(x)}{\partial x_n} \equiv \sum_{k=1}^{m-1} \sum_{l>k}^m \left\{ A^{(k,l)} \cdot (a_{kn} - a_{ln}) \right\} u = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Система (7) есть неоднородная СЛАУ из  $n$  уравнений с  $n$  неизвестными  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . Главной особенностью (7) является ее совместность при любых коэффициентах системы (1). Покажем совместность (7) при  $n = 3$  (в общем случае доказать совместность вызывает сложности в силу громоздкости вычислений).

Пусть  $n = 3$ . Без ограничения общности можно считать, что при помощи элементарных преобразований расширенную матрицу СЛАУ (1) привели к ступенчатому виду

$$(A | A_0) \rightarrow \left( \begin{array}{ccc|c} 1 & a'_{12} & a'_{13} & a'_{10} \\ 0 & a'_{22} & a'_{23} & a'_{20} \\ 0 & 0 & a'_{33} & a'_{30} \\ 0 & 0 & 0 & a'_{40} \end{array} \right),$$

где  $a'_{40} \neq 0$  в силу несовместности СЛАУ (1). Возникает ряд случаев:

1)  $a'_{22} \neq 0, a'_{33} \neq 0$  ( $rgA = 3, rg(A | A_0) = 4$ ). При этом основная матрица  $S$  СЛАУ есть неособенная матрица. В этом случае СЛАУ (7) имеет единственное решение.

2)  $a'_{33} = 0, a'_{22} \neq 0$  ( $rgA = 2, rg(A | A_0) = 3$ ). Основная матрица СЛАУ есть особенная матрица, и СЛАУ имеет однопараметрическое семейство решений вида

$$\bar{x} = \begin{pmatrix} \frac{2a'_{10}a'_{22} - 2a'_{12}(a'_{20} - c) + a'_{12}(a'_{30} + a'_{40}) - a'_{22}(a'_{30} + a'_{40} + 2a'_{13}c)}{2a'_{22}} \\ \frac{2a'_{20} - a'_{30} - a'_{40} - 2a'_{23}c}{2a'_{22}} \\ c \end{pmatrix}, \quad c \in \mathbf{R}.$$

3)  $a'_{33} = a'_{22} = 0, a'_{23} \neq 0$  ( $rgA = 2, rg(A | A_0) = 3$ ). СЛАУ (18) имеет однопараметрическое семейство решений вида

$$\bar{x} = \begin{pmatrix} \frac{2a'_{10}a'_{23} - a'_{13}(2a'_{20} - a'_{30} - a'_{40}) - a'_{23}(a'_{30} + a'_{40}) - 2a'_{12}a'_{23}c}{2a'_{23}} \\ c \\ \frac{2a'_{20} - a'_{30} - a'_{40}}{2a'_{23}} \end{pmatrix}, \quad c \in \mathbf{R}.$$

4)  $a'_{33} = a'_{22} = a'_{23} = 0$  ( $rgA = 1, rg(A | A_0) = 2$ ). СЛАУ (7) имеет двухпараметрическое семейство решений вида

$$\bar{x} = \begin{pmatrix} a'_{10} - \frac{1}{3}(a'_{20} + a'_{30} + a'_{40}) - a'_{12}c_1 - a'_{13}c_2 \\ c_1 \\ c_2 \end{pmatrix}, \quad c_1, c_2 \in \mathbf{R}.$$

Можно сделать следующий вывод. Пусть  $r = rgA$ . Тогда:

1) если  $r = n$ , то СЛАУ (7) содержит ровно  $n$  линейно независимых уравнений с  $n$  неизвестными. Ее единственное решение дает вектор-столбец  $\bar{x} \in \mathbf{R}^n$ , при котором каждая невязка  $z_k$  ( $k = 1, m$ ) минимальна;

2) если  $r < n$ , то СЛАУ (7) содержит ровно  $r$  линейно независимых уравнений с  $n$  неизвестными, и имеет  $(n - r)$ -параметрическое семейство решений:

$$\bar{x} = \bar{y} + \sum_{j=1}^{n-r} \lambda_j \bar{E}_j, \quad (8)$$

где  $\bar{E}_1, \bar{E}_2, \dots, \bar{E}_{n-r}$  – фундаментальная система решений соответствующей однородной системы,  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n-r} \in \mathbf{R}$ ,  $\bar{y}$  – частное решение системы (7).

Для нахождения единственного нормального псевдорешения (1) дополнительно зададим вектор-столбец  $u^{(0)} \in \mathbf{R}^n$ . Требуется найти вектор-столбец  $x^{(0)}$  из множества (8), который наиболее близок к  $u^{(0)}$  в смысле евклидовой нормы:  $d_{\min} = d(x^{(0)}, u^{(0)}) = \inf_{\lambda_1, \dots, \lambda_{n-r}} \|\bar{x} - u^{(0)}\|^2$ .

**Пример.** Найти псевдорешение системы

$$\begin{cases} x_1 + 2x_2 - x_3 = 0, \\ -2x_1 - x_2 + x_4 = -1, \\ 3x_2 - 2x_3 + x_4 = 1, \\ x_1 + 5x_2 - 3x_3 + x_4 = -1, \\ 2x_1 + 4x_2 - 2x_3 = 2, \end{cases}$$

близкое к вектор-столбцу  $u^{(0)} = (1 \ -1 \ 2 \ 0)^T$  при условии минимизации всех невязок.

Представим программную реализацию предложенного алгоритма в СКМ **Maple**.

```
> # цикл формирования системы уравнений (7)
for s from 1 by 1 to n do
  eq[s]:=0:
  for k from 1 by 1 to m do
    for l from k+1 by 1 to m do
      S:=0:
      for j from 0 by 1 to n do
        S:=S+(a[k,j]-a[l,j])*x[j]:
      end do:
      P:=S*(a[k,s]-a[l,s]);
      eq[s]:=eq[s]+P;
    end do;
  end do;
end do:
> sys:={eq[1], eq[2], eq[3], eq[4]}:
# нахождение общего решения СЛАУ вида (7)
Solve:=solve(sys,[x[1], x[2], x[3], x[4]]);
> x_0[1]:=1: x_0[2]:=-1: x_0[3]:=2: x_0[4]:=0:
# вектор-столбец начального приближения
x[1]:=lambda[1]: x[2]:=lambda[2]:
x[3]:=rhs(Solve[1][3]): x[4]:=rhs(Solve[1][4]):
> Function(lambda[1], lambda[2]):=
(x[1]-x_0[1])^2+(x[2]-x_0[2])^2+(x[3]-x_0[3])^2+(x[4]-x_0[4])^2;
Min:=minimize(Function(lambda[1], lambda[2]), location);
```

> lambda[1]:=rhs(Min[2][1][1][1]): lambda[2]:=rhs(Min[2][1][1][2]):  
 Solve:={x[1], x[2], x[3], x[4]};  
 #нахождение нормального псевдорешения СЛАУ, наиболее близкое к u\_0

$$Solve := \left\{ \frac{9}{31}, \frac{17}{31}, \frac{51}{62}, \frac{67}{62} \right\}$$

### Библиографический список

1. Тихонов А. Н. Методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. - М.: Наука, 1986.
2. Тихонов А. Н. О нормальных решениях приближенных систем линейных алгебраических уравнений / А. Н. Тихонов // Доклады АН СССР. 1980. Т. 254, № 3. С. 549-554.
3. Тихонов А.Н. О приближенных системах линейных алгебраических уравнений, Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 1980, том 20, номер 6, 1373–1383.
4. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. М.: Наука, 1988.
5. Нелюхин С.А. Применение СКА wxMaxima к решению задач линейной алгебры. Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2016 [текст]: сб. тр. междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф.: в 4 т. Т.2./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2016; Рязань. – 292 с.
6. Ерохин В. И. Оптимальная матричная коррекция несовместных систем линейных алгебраических уравнений и несобственных задач линейного программирования: Дисс. д-ра физ.-мат. наук: 05.13.17. М., 2005.

УДК 517.9; ГРНТИ 27.29

## ПОСТРОЕНИЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КОШИ КОМБИНИРОВАННОЙ МОДЕЛИ ЭКОНОМИЧЕСКОГО РОСТА И ДЕЛОВОГО ЦИКЛА В НЕКОТОРЫХ СЛУЧАЯХ

Н.С. Карпеев

Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина,  
 Российская Федерация, Рязань, n.karpeev0808@stud.rsu.edu.ru

*Аннотация.* Для трехфакторной динамической модели, составленной на основе объединения модели Самуэльсона – Хикса и модифицированной модели Солоу, предложен способ построения решения задачи Коши, использующий метод непосредственного интегрирования уравнений для национального дохода и капитала и метод последовательных приближений для нелинейного уравнения динамики труда. Рассмотрены два случая структуры решений, и приведены примеры для модельных значений коэффициентов.

*Ключевые слова:* система дифференциальных уравнений; решение задачи Коши; характеристическое уравнение; пространственное решение, модель Солоу, модель Самуэльсона – Хикса.

## BUILDING A SOLUTION TO THE CAUCHY PROBLEM OF A COMBINED MODEL OF ECONOMIC GROWTH AND THE BUSINESS CYCLE IN SOME CASES

N.S. Karpeev

Ryazan State University named after S.A. Esenin,  
 Russia, Ryazan, n.karpeev0808@stud.rsu.edu.ru

*Abstract.* For a three-factor dynamic model based on the combination of the Samuelson – Hicks model and the modified Solow model, a method for constructing a solution to the Cauchy problem using the method of direct integration of equations for national income and capital and the method of successive approximations for the nonlinear equation of labor dynamics is proposed. Two cases of the solution structure are considered, and an example is given for the model values of the coefficients.

*Keywords:* system of differential equations; solution of the Cauchy problem; characteristic equation; spatial solution, Solow model, Samuelson – Hicks model.

Рассмотрим динамическую модель односекторной экономики

$$\begin{cases} \ddot{Y} + (1-r)\dot{Y} + (1-c)Y = I + C, \\ \dot{K} = -\mu K + \sigma Y, \\ \dot{L} = bL - pL^2 + aY, \end{cases} \quad (1)$$

где  $K$  – капитал (стоимость основных фондов);

$L$  – труд (численность населения, занятого в экономике);

$Y$  – национальный доход;

$I$  – внешние постоянные инвестиции;

$C$  – конечное постоянное потребление;

$\mu \in (0;1)$  – норма амортизации;

$\sigma \in (0;1)$  – норма накопления;

$b \in (-1;1)$  – темп роста труда;

$r \in (0;1)$  – норма акселерации;

$c \in (0;1)$  – предельная склонность к потреблению;

$a \in (-1;1)$  – темп роста труда, обусловленный производственным потреблением.

Первое уравнение системы (1) представляет собой классическое уравнение Самуэльсона – Хикса [1], отвечающее за возникновение циклов в экономике. Второе и третье уравнение представляют модификацию модели Солоу, в которую введен фактор конкуренции за рабочие места ( $-pL^2$ ,  $p = \frac{b}{M}$ ,  $M$  – максимально возможное число рабочих мест в регионе) [2, 3] и фактор влияния потребления на численность населения, занятого в экономике  $aY$  [4]. Ввод третьего фактора (национального дохода  $Y$ ) в модель экономического роста позволяет избавиться от проблемы подбора производственной функции.

Рассмотрим следующую задачу Коши системы (1):

$$Y(t_0) = Y_0, \dot{Y}(t_0) = Y_1, K(t_0) = K_0, L(t_0) = L_0. \quad (2)$$

Как показано в [5], решение задачи (1)–(2) имеет вид

$$\begin{cases} Y(t) = C_1 y_1(t) + C_2 y_2(t) + Y_e, \\ K(t) = K_0 e^{-\mu(t-t_0)} + \sigma e^{-\mu(t-t_0)} \int_{t_0}^t Y(\tau) e^{\mu(t-\tau)} d\tau, \\ L_n(t) = L_0 + \int_{t_0}^t (bL_{n-1}(\tau) - pL_{n-1}^2(\tau) + aY(\tau)) d\tau, \quad \lim_{n \rightarrow +\infty} L_n(t) = L(t), \end{cases} \quad (3)$$

где  $\{y_1(t), y_2(t)\}$  – фундаментальная система решений линейного однородного дифференциального уравнения

$$\ddot{Y} + (1-r)\dot{Y} + (1-c)Y = 0, \quad (4)$$

определяемая корнями соответствующего характеристического уравнения  $k_{1,2} = \frac{-(1-r) \pm \sqrt{D}}{2}$ ,

$D = (1-r)^2 - 4(1-c)$ ,  $C_1, C_2$  – произвольные постоянные, которые могут быть найдены из начальных условий (2);  $Y_e = \frac{I+C}{1-c}$  – состояние равновесия первого уравнения системы (1).

При заданной точности  $\varepsilon > 0$  можно найти количество  $n$  приближений  $L_n(t)$  к  $L(t)$  по формуле [6]

$$n > \frac{1}{\ln \alpha} \ln \frac{\varepsilon(1-\alpha)}{\rho(L_1(t), L_0)}, \quad (5)$$

$$\rho(L_1(t), L_0) = \max_{t \in [t_1, t_2]} \left| (bL_0 - pL_0^2)(t-t_0) + a \int_{t_0}^t Y(\tau) d\tau \right|, \quad (6)$$

$$\alpha = |b - 2pL_1|(t_2 - t_1) < 1 \text{ на множестве } \Delta = [t_1, t_2] \times [L_1, L_2] \subset \mathbf{R}^2. \quad (7)$$

Случай  $D > 0$  исследован в [4]. Рассмотрим случаи: 1)  $D < 0$ ,  $(1-r) > 0$  и 2)  $D < 0$ ,  $(1-r) = 0$ .

Случай 1. Пусть  $D < 0$ ,  $(1-r) > 0$ , корни характеристического уравнения будут комплексно-сопряженными  $k_{1,2} = \frac{-(1-r)}{2} \pm \frac{\sqrt{|D|}}{2}i$ . Обозначим  $\beta = \frac{-(1-r)}{2}$ ,  $\omega = \frac{\sqrt{|D|}}{2}$ . Тогда решение задачи Коши первого уравнения задачи (1)–(2) имеет вид

$$\begin{aligned} Y(t) &= C_1 e^{\beta t} \cos \omega t + C_2 e^{\beta t} \sin \omega t + Y_e, \quad (8) \\ C_1 &= (Y_0 - Y_e) e^{-\beta t_0} \left( \frac{\beta}{\omega} \sin \omega t_0 + \cos \omega t_0 \right) - \frac{Y_1}{\omega} e^{-\beta t_0} \sin \omega t_0, \\ C_2 &= \frac{Y_1}{\omega} e^{-\beta t_0} \cos \omega t_0 - (Y_0 - Y_e) e^{-\beta t_0} \left( \frac{\beta}{\omega} \cos \omega t_0 + \sin \omega t_0 \right). \end{aligned}$$

Подставляя (8) во вторую и третью функции системы (4), задав точность  $\varepsilon > 0$  и вычисляя последовательной значения выражений (7), (6), (5), можно найти решение  $K(t)$  количество приближений  $L_n(t)$ , определяющих  $L(t)$  с заданной точностью  $\varepsilon > 0$ .

Случай 2. Пусть  $D < 0$ ,  $(1-r) = 0$ , корни характеристического уравнения будут чисто мнимыми  $k_{1,2} = \pm \frac{\sqrt{|D|}}{2}i$ . Обозначим  $\omega = \frac{\sqrt{|D|}}{2}$ . Тогда решение задачи Коши первого уравнения задачи (1)–(2) имеет вид

$$\begin{aligned} Y(t) &= C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t + Y_e, \quad (9) \\ C_1 &= (Y_0 - Y_e) \cos \omega t_0 - \frac{Y_1}{\omega} \sin \omega t_0, \\ C_2 &= \frac{Y_1}{\omega} e^{-\alpha t_0} \cos \omega t_0 - (Y_0 - Y_e) e^{-\alpha t_0} \left( \frac{\alpha}{\omega} \cos \omega t_0 + \sin \omega t_0 \right). \end{aligned}$$

Подставляя (9) во вторую и третью функции системы (4), задав точность  $\varepsilon > 0$  и вычисляя последовательной значения выражений (7), (6), (5), можно найти решение  $K(t)$  количество приближений  $L_n(t)$ , определяющих  $L(t)$  с заданной точностью  $\varepsilon > 0$ .

В силу громоздкости записи вычислений в общем виде покажем поведение траекторий системы (1) при начальных условиях (2) на примерах. Заметим, что некоторые коэффициенты системы (1) были вычислены на основе идентификации разностного аналога модели (1) с использованием статистических данных Федеральной службы государственной статистики [8]:  $\mu = 0,1$ ,  $\sigma = 0,6$ ,  $b = 0,06$ ,  $a = -0,00028$ ,  $p = 0,0026$ . Остальные коэффициенты и начальные условия являются модельными.

**Пример 1.** Пусть коэффициенты  $r = 0,3$ ,  $c = 0,6$ ,  $I = 10$ ,  $C = 4$ . Начальные условия (2) приняли значения  $Y(0) = 300$ ,  $\dot{Y}(0) = 3$ ,  $K(0) = 150$ ,  $L(0) = 70$ . Тогда  $D = -1,11 < 0$ ,  $(1-r) = 0,7 > 0$ , корни характеристического уравнения будут комплексно-сопряженными

$k_{1,2} = -0,35 \pm 0,53i$ . Тогда решение задачи Коши первого и второго уравнений системы (1) и первое приближение решения задачи Коши третьего уравнения имеют вид

$$Y(t) = 265e^{-0,35t} \cos 0,53t + 181,76e^{-0,35t} \sin 0,53t + 35, \quad (10)$$

$$K(t) = 225,88e^{-0,1t} - 285,88e^{-0,35t} \cos 0,53t + 166,16e^{-0,35t} \sin 0,53t + 210, \quad (11)$$

$$L_1(t) = 69,87 - 8,55t - 0,53e^{-0,35t} \sin 0,53t + 0,13e^{-0,35t} \cos 0,53t. \quad (12)$$

Оценим количество приближений функции  $L(t)$ . Зададим  $\varepsilon = 0,1$  – точность приближения. Определим границы множества  $\Delta = [t_1, t_2] \times [L_1, L_2]$ . Пусть  $t_1 = t_0 = 0$ ,  $L_1 = L_1(t_0) = L_0 = 70$ . Так как функция  $L_1(t)$  (12) имеет строго убывающий линейный тренд с затухающими колебаниями около него, то  $M = |b - 2pL_1| = 0,304$ . Найдем  $t_2$  так, чтобы выполнялось неравенство  $|b - 2pL_1|(t_2 - t_1) < 1$ , откуда  $t_2 < 3,29$ , выберем  $t_2 = 3$ . Тогда  $\alpha < 0,912$ ,  $L_2 = L_1(t_2) = 44,20$ , а число последовательных приближений в соответствии с формулой (5)  $n \geq 92$ . Графики функций (10), (11), (12) представлены на рисунках 1–3, а фазовая траектория системы (1) при начальных условиях  $Y(0) = 300$ ,  $\dot{Y}(0) = 3$ ,  $K(0) = 150$ ,  $L(0) = 70$  – на рисунке 4.

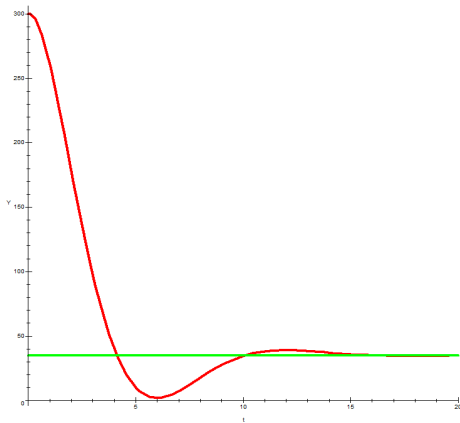


Рис. 1. График функции  $Y(t)$  при начальных условиях  $Y(0) = 300$ ,  $\dot{Y}(0) = 3$ ,  $t \in [0; 20]$

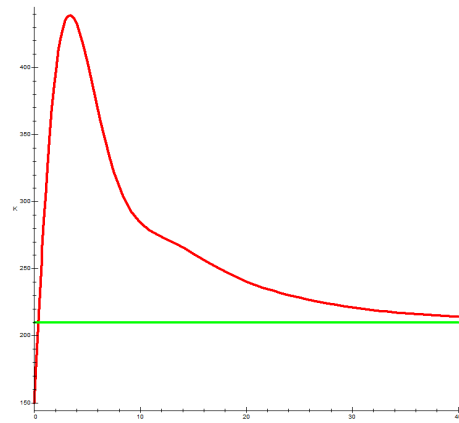


Рис. 2. График функции  $K(t)$  при начальном условии  $K(0) = 150$ ,  $t \in [0; 40]$

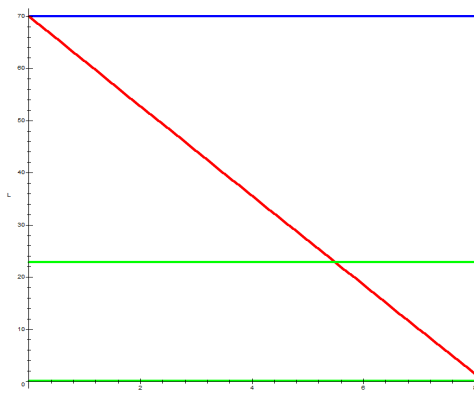


Рис. 3. График функций  $L_0(t)$  (синий) и  $L_1(t)$  (красный) при начальном условии  $L(0) = 70$ ,  $t \in [0; 3]$

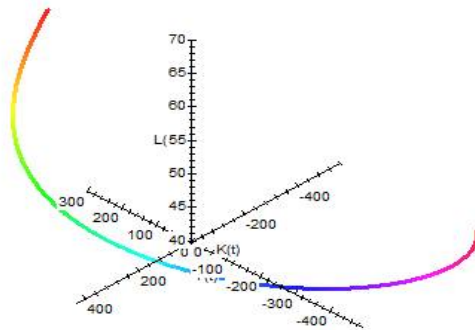


Рис. 4. Фазовая траектория решения  $\{Y(t), K(t), L(t)\}$  при начальных условиях  $Y(0) = 300$ ,  $\dot{Y}(0) = 3$ ,  $K(0) = 150$ ,  $L(0) = 70$ ,  $t \in [0; 8]$



В работе [8] показано, что система (1) имеет две особые точки  $A_1(Y_e; 0; K_e; L_{e1})$  и  $A_2(Y_e; 0; K_e; L_{e2})$ ,  $Y_e = \frac{I+C}{1-c}$ ,  $K_e = \frac{\sigma}{\mu} Y_e$ ,  $L_{e1,2} = \frac{b \pm \sqrt{b^2 + 4paY_e}}{2p}$ . При заданных значениях коэффициентов особые точки имеют вид  $A_1(35; 0; 210; 22,9)$  и  $A_2(35; 0; 210; 0,16)$ , то есть оба положительны (равновесные траектории представлены на рисунках 1–3 зеленым цветом). Собственные значения матрицы соответствующей системы линейного приближения в окрестности точки  $A_1$  равны  $\lambda_1 = -0,1$ ;  $\lambda_2 = -0,059$ ;  $\lambda_{3,4} = -0,35 \pm 0,53i$ ; а в окрестности точки  $A_2$  равны  $\lambda_1 = -0,1$ ;  $\lambda_2 = 0,059$ ;  $\lambda_{3,4} = -0,35 \pm 0,53i$ ; следовательно, особая точка  $A_1$  является асимптотически устойчивой, а особая точка  $A_2$  – неустойчивой. Таким образом, модель (1) при заданных значениях параметров имеет продуктивные [4] состояния равновесия и может рассматриваться в качестве модели формальной односекторной экономики.

**Пример 2.** Пусть коэффициенты  $r=1$ ,  $c=0,6$ ,  $I=10$ ,  $C=4$ . Начальные условия (2) приняли значения  $Y(0)=30$ ,  $\dot{Y}(0)=3$ ,  $K(0)=15$ ,  $L(0)=70$ . Тогда  $D=-1,6 < 0$ ,  $(1-r)=0$ , корни характеристического уравнения будут чисто мнимыми  $k_{1,2} = \pm 63i$ . Тогда решение задачи Коши первого и второго уравнений системы (1) и первое приближение решения задачи Коши третьего уравнения имеют вид

$$Y(t) = -0,5 \cos 0,63t + 4,74 \sin 0,63t + 35, \quad (13)$$

$$K(t) = 210 - 189,88 e^{-0,1t} - 5,12 \cos 0,63t - 3,93 \sin 0,63t, \quad (14)$$

$$L_1(t) = 70 - 8,55t - 0,0022 \sin 0,63t + 0,0021 \cos 0,63t. \quad (15)$$

Оценим количество приближений функции  $L(t)$ . Зададим  $\varepsilon = 0,1$  – точность приближения. Определим границы множества  $\Delta = [t_1, t_2] \times [L_1, L_2]$ . Пусть  $t_1 = t_0 = 0$ ,  $L_1 = L_1(t_0) = L_0 = 70$ . Так как функция  $L_1(t)$  (15) имеет строго убывающий линейный тренд с ограниченными колебаниями около него, то  $M = |b - 2pL_1| = 0,304$ . Найдем  $t_2$  так, чтобы выполнялось неравенство  $|b - 2pL_1|(t_2 - t_1) < 1$ , откуда  $t_2 < 3,29$ , выберем  $t_2 = 3$ . Тогда  $\alpha < 0,912$ ,  $L_2 = L_1(t_2) = 44,35$ , а число последовательных приближений в соответствии с формулой (5)  $n \geq 92$ . Графики функций (13), (14), (15) представлены на рисунках 5–7, а фазовая траектория системы (1) при начальных условиях  $Y(0)=30$ ,  $\dot{Y}(0)=3$ ,  $K(0)=15$ ,  $L(0)=70$  – на рисунке 8.

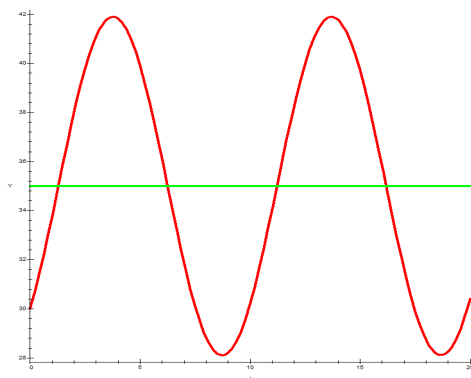


Рис. 5. График функции  $Y(t)$  при начальных условиях  $Y(0)=30$ ,  $\dot{Y}(0)=3$ ,  $t \in [0; 20]$

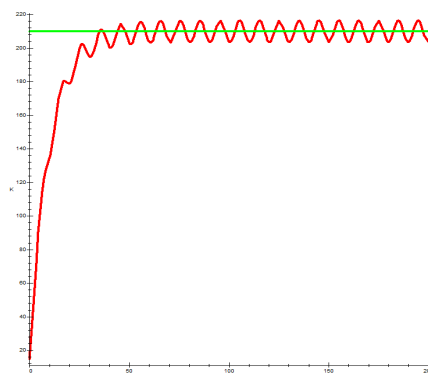


Рис. 6. График функции  $K(t)$  при начальном условии  $K(0)=15$ ,  $t \in [0; 200]$

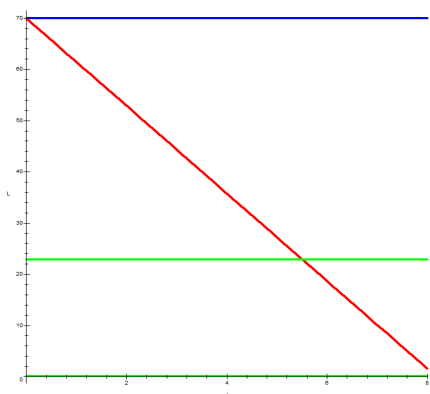


Рис. 7. График функций  $L_0(t)$  (красный) и  $L_1(t)$  (синий) при начальном условии  $L(0)=70$ ,  $t \in [0; 3]$

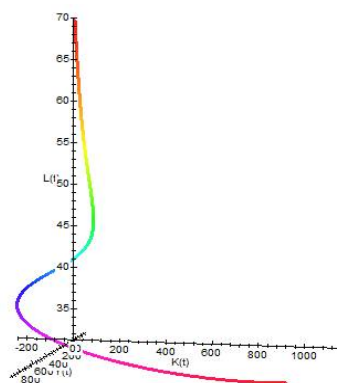


Рис. 8. Фазовая траектория решения  $\{Y(t), K(t), L(t)\}$  при начальных условиях  $Y(0)=30$ ,  $\dot{Y}(0)=3$ ,  $K(0)=15$ ,  $L(0)=70$ ,  $t \in [0; 10]$

Особые точки системы (1) при значениях коэффициентов из данного примера имеют координаты  $A_1(35; 0; 210; 22,9)$  и  $A_2(35; 0; 210; 0,16)$ , то есть обе положительны (равновесные траектории представлены на рисунках 5–7 зеленым цветом). Собственные значения матрицы соответствующей системы линейного приближения в окрестности точки  $A_1$  равны  $\lambda_1 = -0,1$ ;  $\lambda_2 = -0,059$ ;  $\lambda_{3,4} = -0,35 \pm 0,63i$ ; а в окрестности точки  $A_2$  равны  $\lambda_1 = -0,1$ ;  $\lambda_2 = 0,059$ ;  $\lambda_{3,4} = -0,35 \pm 0,63i$ ; следовательно, особая точка  $A_1$  является асимптотически устойчивой, а особая точка  $A_2$  – неустойчивой. Таким образом, модель (1) при заданных значениях параметров имеет продуктивные [4] состояния равновесия и может рассматриваться в качестве модели формальной односекторной экономики.

Дальнейшее исследование модели (1)–(2) предполагает написание вычислительного алгоритма, позволяющего находить заданное число приближений  $L_n(t)$ , а также постановку и решение оптимизационной задачи.

### Библиографический список

1. Колемаев В.А. Исследование поведения модели Самуэльсона – Хикса // Проблемы управления. – 2006. – № 1. – С. 16–19.
2. Лазарева И.А., Лискина Е.Ю. Построение и идентификация односекторной модели экономики региона, учитывающей конечное потребление и конкуренцию за ограниченные ресурсы // Вестник РАЕН. – 2016. – Т. 16, № 3. – С. 36–40.
3. Лискина Е.Ю. Исследование трехфакторной динамической системы экономики региона, учитывающей конечное потребление и ограниченные ресурсы // Итоги науки и техн. Сер. Современ. мат. и ее прил. Темат. обз. – 2018. – № 148. – С. 75–82.
4. Абрамов В.В. Стационарные состояния в модели односекторной экономики // Дифференциальные уравнения и математическое моделирование: межвуз. сб. науч. тр. Вып. 2. – Рязань: Изд-во РГУ имени С.А. Есенина, 2021. – С. 4–9.
5. Карпеев Н.С. Задача Коши для комбинированной трехфакторной динамической модели экономического роста и делового цикла // Дифференциальные уравнения и математическое моделирование : межвуз. сб. науч. тр. / отв. ред. С. С. Мамонов. – Вып. 5. – Рязань : Ряз. гос. ун-т имени С. А. Есенина, 2023. – С. 65–70.
6. Дерр В.Я. Функциональный анализ. Лекции и упражнения. – М.: Юрайт, 2012. – 464 с.
7. Регионы России. Социально-экономические показатели: статистический сборник. 2010–2021 гг. // Федеральная служба государственной статистики: [сайт]. – URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13204> (дата обращения: 04.03.2023).
8. Карпеев Н. С. Качественное исследование трехфакторной динамической модели // Системы управления, сложные системы: моделирование, устойчивость, стабилизация, интеллектуальные технологии: сборник трудов молодежной секции в рамках IX Международной научно-практической конференции (24–25 апреля 2023 г.). – Елец: Елецкий государственный университет имени И. А. Бунина, 2023. – С. 68–73.

УДК 330.4; ГРНТИ 06.52.17

## ПАНЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕГИОНАЛЬНЫХ РАЗЛИЧИЙ ОДНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НАУЧНОГО ПОТЕНЦИАЛА РЕГИОНОВ ЦЕНТРАЛЬНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА

**И.В. Толкачева**

*Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина,  
Россия, Рязань, irinka.tolkacheva@bk.ru*

*Аннотация.* Предложена модель научного потенциала регионов Центрального федерального округа, в которой объясненной переменной является объем инновационных товаров (работ, услуг), регрессорами являются передовые производственные технологии, поступление патентных заявок и выдача патентов в России, внутренние текущие затраты на научные исследования и разработки по видам затрат, численность исследователей с учеными степенями, внутренние затраты на научные исследования и разработки, численность персонала, занятого научными исследованиями и разработками, организации, выполнявшие научные исследования и разработки. Методами панельного анализа установлено, что регионы являются автономными с позиции развития научного потенциала. Выполнена группировка регионов ЦФО по значимым факторам научного потенциала.

*Ключевые слова:* научный потенциал, панельный анализ, регрессионная модель, математическая модель, статистика, корреляционный анализ.

## PANEL ANALYSIS OF REGIONAL DIFFERENCES IN ONE MATHEMATICAL MODEL OF THE SCIENTIFIC POTENTIAL OF THE REGIONS OF THE CENTRAL FEDERAL DISTRICT

**I.V. Tolkacheva**

*Ryazan State University named after S.A. Esenin,  
Russia, Ryazan, irinka.tolkacheva@bk.ru*

*Abstract.* A model of the scientific potential of the regions of the Central Federal District is proposed, in which the explained variable is the volume of innovative goods (works, services), regressors are advanced production technologies, receipt of patent applications and issuance of patents in Russia, internal current costs of research and development by type of costs, the number of researchers with academic degrees, internal costs of scientific research research and development, the number of personnel engaged in scientific research and development, organizations, who carried out scientific research and development. Panel analysis methods have established that the regions are autonomous from the point of view of the development of scientific potential. The Central Federal District regions were grouped according to significant factors of scientific potential.

*Keywords:* scientific potential, panel analysis, regression model, mathematical model, statistics, correlation analysis.

В условиях конкурентной борьбы за ограниченные ресурсы и современной политической обстановки весьма актуальной является задача повышения экономической национальной безопасности страны [1, 2, 3]. Решение этой задачи невозможно без развития научного и научно-технического потенциала страны [1]. В связи с этим актуальна задача разработки управленческих решений в сфере повышения научного на основе математических моделей, построенных с помощью анализа статистических данных. Так, например, в работах [4, 5, 6] выполнено исследование промышленного потенциала России в целом и Центрального федерального округа в частности, при этом отслеживается влияние факторов инновационной деятельности на валовой региональный продукт.

Как отмечено в [2], исследования научного и научно-технического потенциала ведутся с 1970-х годов XX века, причем с началом становления цифрового общества и «большими вызовами» современности интерес к таким исследованиям существенно возрос. В работе [2] проводится методологический анализ и трансформация понятия «научно-технический потенциал». В работах [1, 3] дан методологический анализ понятия «научный потенциал», предложены факторные модели его составляющих. В работе [1] изучается научный потенциал 4-х

территорий: Пермского края, Свердловской области, республики Татарстан, Нижегородской области. В статье [2] исследованы регионы Дальневосточного федерального округа. Анализ работ показывает недостаточную изученность проблемы как с позиции регионов, так и с позиции математического моделирования.

В данном исследовании исследуется ресурсный подход к построению модели научного потенциала региона [1, 2, 3]. Объектами исследования являются регионы Центрального федерального округа (ЦФО),  $n = 18$ . Период времени: с 2000 по 2021 год (годы 2022 и 2023 оставлены для последующей проверки адекватности модели),  $T = 22$ . Зависимая переменная  $Y$  – объем инновационных товаров (работ, услуг). Показатели  $X_i$  ( $i = \overline{1; 7}$ ) представлены следующей логической моделью:

$X_1$  – используемые передовые производственные технологии (шт.);

$X_2$  – поступление патентных заявок и выдача патентов в России (шт.);

$X_3$  – внутренние текущие затраты на научные исследования и разработки по видам затрат (млн. руб.);

$X_4$  – численность исследователей с учеными степенями (чел.);

$X_5$  – внутренние затраты на научные исследования и разработки (млн. руб.);

$X_6$  – численность персонала, занятого научными исследованиями и разработками (чел.);

$X_7$  – организации, выполнявшие научные исследования и разработки (шт.).

Для переменных  $Y$ ,  $X_i$  ( $i = \overline{1; 7}$ ) по данным статистических сборников [7] была собрана панель, содержащая 396 наблюдений.

Для указанного набора факторов были выполнены расчеты описательной статистики (таблица 1) и корреляционный анализ (таблица 2).

Таблица 1. Показатели описательной статистики панели факторов логической модели

Переменная	Среднее	Стандартная ошибка	Медиана	Стандартное отклонение	Экссесс	Асимметричность	Мин.	Макс.
$Y$	39837,94	5629,408	7178	112023,8	28,5068	5,0632	126	910869,1
$X_1$	3240,861	212,8105	1751	4234,875	5,4697	2,4798	77	20649
$X_2$	679,1187	88,5091	148	1761,308	16,2754	3,9758	25	12681
$X_3$	346237,3	217519,5	1423,9	4328584	200,3927	14,1346	13,845	65807158
$X_4$	3188,192	509,2019	236	10132,99	12,4775	3,7307	14	48158
$X_5$	17874,32	3069,28	1292,85	61077,9	24,6030	4,7968	13,8	460696,3
$X_6$	21691,78	2867,433	2938,5	57061,19	10,144й	3,3329	50	276825
$X_7$	79,21717	8,894481	25	176,9979	11,8181	3,5773	6	907

Таблица 2. Корреляционная матрица факторов для стандартной модели панельных данных

	$Y$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$
$Y$	1							
$X_1$	0,6797	1						
$X_2$	0,6483	0,7799	1					
$X_3$	-0,0130	0,1127	0,2322	1				
$X_4$	0,5828	0,7308	0,9579	0,3026	1			
$X_5$	0,8617	0,7595	0,8179	0,0648	0,8026	1		
$X_6$	0,5873	0,7966	0,9470	0,3043	0,9836	0,7891	1	
$X_7$	0,6186	0,7452	0,9192	0,3105	0,9690	0,8024	0,9744	1

Корреляционный анализ показал высокую степень зависимости выбранных факторов  $X_i$  ( $i = \overline{1; 7}$ ) между собой. Был выявлен фактор  $X_3$ , который не связан с переменной  $Y$ , так как его коэффициент корреляции  $r_{YX_3} = -0,0130$ .

Далее оценивалось сквозное уравнение линейной регрессии вида

$$Y_{i(t)} = a_0 + \sum_{j=1}^7 a_j X_{i(t),j} + \varepsilon_{i(t)}, \quad t = \overline{2000; 2021}. \quad (1)$$

Выяснилось, что константа  $a_0$  является статистически незначимой. Методом исключения из уравнения (1) были удалены незначимый фактор  $X_3$  и коллинеарные факторы  $X_6$ ,  $X_1$ . Результаты метода исключения представлены в таблице 3 (жирным шрифтом выделены значения, превосходящие выбранный уровень значимости).

Таблица 3. Результаты метода исключения для панели данных

Характеристика	Исключённая переменная				
	нет	нет	$X_3$	$X_6$	$X_1$
$R^2$	0,8127	0,8334	0,8332	0,8326	0,8319
$P$ для $a_0$	<b>0,3199</b>	–	–	–	–
$P$ для $a_1$	0,0430	<b>0,0761</b>	<b>0,0789</b>	<b>0,2038</b>	–
$P$ для $a_2$	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$1,5 \cdot 10^{-8}$	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$7,4 \cdot 10^{-9}$	$1,2 \cdot 10^{-12}$
$P$ для $a_3$	<b>0,5858</b>	<b>0,5841</b>	–	–	–
$P$ для $a_4$	$7,2 \cdot 10^{-8}$	$3,8 \cdot 10^{-8}$	$4,2 \cdot 10^{-8}$	$3,5 \cdot 10^{-21}$	$6,3 \cdot 10^{-29}$
$P$ для $a_5$	$2,2 \cdot 10^{-60}$	$2,1 \cdot 10^{-68}$	$6,3 \cdot 10^{-71}$	$2,0 \cdot 10^{-80}$	$1,9 \cdot 10^{-84}$
$P$ для $a_6$	<b>0,1301</b>	<b>0,2186</b>	<b>0,2219</b>	–	–
$P$ для $a_7$	$5,2 \cdot 10^{-8}$	$2,2 \cdot 10^{-8}$	$1,4 \cdot 10^{-8}$	$1,4 \cdot 10^{-8}$	$2,8 \cdot 10^{-12}$

Регрессионное уравнение для исследования приняло вид

$$Y_{i(t)} = \sum_{j \in \{2,4,5,7\}} a_j X_{i(t),j} + \varepsilon_{i(t)}, \quad t = \overline{2000; 2021}. \quad (2)$$

Вместе с уравнением (2) рассматривалось уравнение с индивидуальными эффектами  $u_i$  объектов исследования для выявления системных (FE) или случайных (RE) региональных различий

$$Y_{i(t)} = \sum_{j \in \{2,4,5,7\}} a_j X_{i(t),j} + u_i + \varepsilon_{i(t)}, \quad t = \overline{2000; 2021}. \quad (3)$$

Кроме того длина временного ряда позволила рассмотреть регрессионную модель (2) для каждого региона ЦФО (так называемая UR-модель несвязанных регрессий).

Основные статистические характеристики построенных уравнений приведены в таблице 4. Для моделей несвязанных регрессий на первом этапе не определялись значения статистики дарбина – Уотсона значение информационного критерия Акаике и средняя ошибка аппроксимации.

Далее для всех моделей проверялась стандартная тройка тестов (Вальда, LM-тест Бройша – Пагана и тест Хаусмана). Результаты проверки гипотез – в таблице 5.

Из таблицы 5 следует, что по возрастанию предпочтительности модели следует расположить следующим образом: OR, FE, RE, UR, т.е. наилучшей является модель несвязанных регрессий.

Таким образом, объем инновационных товаров (работ, услуг) статистически значимо определяется следующими факторами:

$X_2$  – поступление патентных заявок и выдача патентов в России (шт.);

$X_4$  – численность исследователей с учеными степенями (шт.);

$X_5$  – внутренние затраты на научные исследования и разработки (млн. руб.);

$X_7$  – организации, выполнявшие научные исследования и разработки (шт.).

При этом региональные различия существенны настолько, что общую модель даже по достаточно однородному с точки зрения промышленного потенциала (см. [6]) ЦФО построить нельзя. Группировка регионов по статистически значимым факторам приведена в таблице 6.

Таблица 4. Основные статистические характеристики регрессионных моделей

Характеристика	Модель				
	OR-модель	UR-модель		FE-модель	RE-модель
		минимальный	максимальный		
$R^2$	0,8319	0,3499	0,9733	0,7610	0,7610
Остаточная сумма квадратов (RSS)	$9,4 \cdot 10^{11}$	$\sum_{i=1}^{18} RSS_i = 6,9 \cdot 10^{11}$		$6,8 \cdot 10^{11}$	$6,8 \cdot 10^{11}$
Значимость F-статистики	$4,3 \cdot 10^{-150}$	$2,4 \cdot 10^{-13}$	0,0884	$3,0 \cdot 10^{-120}$	$2,9 \cdot 10^{-120}$
Статистика Дарбина – Уотсона	0,9925	–	–	1,4046	1,4045
Значение информационного критерия Акаике	21,6068	–	–	21,2860	21,2859
Средняя ошибка аппроксимации	6,0007	–	–	1,3088	1,3812

Таблица 5. Наблюдаемые и критические значения тестов о выборе наилучшей модели

Тест	Значение		Вывод
	Наблюдаемое	Критическое	
F-тест Вальда (OR-модель предпочтительнее FE-модели)	37,066	2,395	отклонена
F-тест Вальда (UR-модель предпочтительнее FE-модели)	0,671	2,396	принята
LM-тест Бройша – Пагана (OR-модель предпочтительнее RE-модели)	4,261	3,841	отклонена
Тест Хаусмана (RE-модель предпочтительнее FE-модели) в виде вспомогательной регрессии $Y(\lambda) = X(\lambda)\alpha + Z_W\gamma + \varepsilon$	Все компоненты вектора $\gamma$ статистически незначимы		принята

Таблица 6. Статистически значимые факторы в регионах ЦФО

Факторы	Субъекты федерации
$X_2, X_4, X_5, X_7$	Белгородская
$X_4, X_5, X_7$	Владимирская
$X_4, X_5$	Ивановская, г. Москва
$X_4, X_7$	Калужская, Рязанская, Тамбовская
$X_4$	Брянская, Липецкая
$X_5$	Воронежская, Московская, Костромская, Курская, Тульская, Ярославская
Нет значимых факторов	Орловская, Смоленская

Таким образом, в Рязанской области наиболее значимо влияющими на объем инновационных товаров (работ, услуг) являются факторы  $X_4$  – численность исследователей с учеными степенями (чел.) и  $X_7$  – организации, выполнявшие научные исследования и разработки (шт.).

Далее предполагается дополнить данную модель следующими факторами, предложенными в [1] и не учитывавшимися в этой модели: численность студентов по программам бакалавриата, специалитета, магистратуры, чел., средства из федерального бюджета на государственные программы на науку и инновации в регионах, млн руб.; уровень инновационной активности организаций регионов %, средний размер заработной платы научного сотрудника в регионах, руб. Предполагается также рассмотреть лаговую модель, которая позволяет учесть запаздывание влияния факторов во времени, а также изучить динамику влияния скрытых факторов на рассматриваемом промежутке времени.

### Библиографический список

1. Шипицина, С.Е. Повышение научного потенциала в российских регионах – стратегические национальные приоритеты России / С.Е. Шипицина, Е.А. Жуйкова // Уровень жизни населения регионов России. – 2022. – Т. 18, № 4. – С. 439–449. – DOI: 10.19181/lsprr.2022.18.4.2.
2. Голова, И. М. Научно-технический потенциал регионов как основа технологической независимости РФ / И. М. Голова // Экономика региона. – 2022. – Т. 18, вып. 4. – С. 1062–1074. – DOI: <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2022>.
3. Полянская, Н.М. Научный потенциал как фактор инновационного социальноэкономического развития регионов / Н.М. Полянская, А.А. Колесняк, Е.И. Коваленко // Вопросы инновационной экономики. – 2022. – Т. 12, № 1. – С. 519–534. – DOI: 10.18334/vines.12.1.114260.
4. Андреев, А.С. Моделирование промышленного потенциала региона / А.С. Андреев, Е.Ю. Лискина // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2019: сб. тр. II междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. / под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязанский гос. радиотехн. ун-т, 2019; Рязань. – Т.5. – С. 46–51.
5. Андреев, А.С. Оценка промышленного потенциала регионов на примере Центрального федерального округа / А.С. Андреев, Е.Ю. Лискина // Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук: материалы V Междунар. науч.-практ. конф. (школы-семинара) молодых ученых. – Тольятти: Издатель Качалин Александр Васильевич, 2019. – С. 97–102.
6. Лискина, Е.Ю. Устранение автокорреляции в панельной модели промышленного потенциала регионов Центрального федерального округа / Е.Ю. Лискина, Р.С. Румянцев // Перспективы и возможности использования цифровых технологий в науке, образовании и управлении. сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. – Астрахань: Астраханский государственный университет имени В. Н. Татищева, 2022. – С. 17–21.
7. Регионы России. Социально-экономические показатели: статистический сборник. 2010–2022 гг. // Федеральная служба государственной статистики: [сайт]. – URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13204> (дата обращения: 28.10.2023 г.).

УДК 517.925; ГРНТИ 27.29.17

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ СИСТЕМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ С НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ ЧЕТНОЙ СТЕПЕНИ

Е.Ю. Лискина

Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина,  
Российская Федерация, Рязань, [katelis@yandex.ru](mailto:katelis@yandex.ru)

*Аннотация.* Предложено компьютерное исследование нелинейной системы обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка с постоянными коэффициентами в случае пары число мнимых собственных значений матрицы системы линейного приближения и квадратичной нелинейностью правой части. С использованием компьютерных методов исследуется влияние аффинного преобразования с заданными свойствами на фазовый портрет системы в окрестности критической особой точки.

*Ключевые слова:* система нелинейных дифференциальных уравнений; критический случай; предельный цикл; бифуркация Андронова – Хопфа; фазовый портрет.

## COMPUTER MODELING OF TRAJECTORIES OF SYSTEMS OF DIFFERENTIAL EQUATIONS WITH EVEN DEGREE NONLINEARITY

E.Yu. Liskina

*Ryazan State University named after S.A. Esenin,  
Russia, Ryazan, katelis@yandex.ru*

*Abstract.* A computer study of a nonlinear system of second-order ordinary differential equations with constant coefficients is proposed in the case of a pair of imaginary eigenvalues of a matrix of a linear approximation system and quadratic nonlinearity of the right part. The effect of an affine transformation with specified properties on the phase portrait of a system in the vicinity of a critical singular point is investigated using computer methods.

*Keywords:* system of nonlinear differential equations; critical case; limit cycle; Andronov–Hopf bifurcation; phase portrait.

Доказательство аналитической разрешимости проблемы различения центра и фокуса предложено в работе [1]. Для приложений и компьютерного моделирования процессов представляют интерес коэффициентные условия различения. Обзор исследований в [2] показал, что такие условия получены либо для систем с нелинейностью нечетной степени, либо для систем, обладающих определенной симметрией правых частей уравнений. В работах [2, 3] сформулированы и доказаны коэффициентные условия различения центра и фокуса, основанные на аффинном преобразовании системы координат и использовании метода неподвижных точек нелинейного оператора. В данной работе предлагается компьютерное моделирование влияния аффинного преобразования системы координат на поведение фазовых траекторий одной системы дифференциальных уравнений с нелинейностью четной степени.

Рассмотрим динамическую систему

$$\dot{x} = Ax + f(x), \quad (1)$$

в которой  $x \in \mathbf{R}^2$ ,  $A = \begin{pmatrix} a & b \\ -c & -a \end{pmatrix}$  – матрица, имеющая пару чисто мнимых собственных значений  $\lambda_{1,2} = \pm \omega i$  ( $\omega = \sqrt{bc - a^2}$ ,  $a^2 < bc$ ,  $bc > 0$ , [2, 3]),  $f(x)$  – вектор-форма четного порядка  $k \geq 2$  относительно компонент вектора  $x$ ,  $\|x\| = \max_{i=1,2} \{|x_i|\}$ . В работах [2, 3] помощью аффинного преобразования системы координат  $x = (E + M)y$ , ( $M = (m_{ij}(\mu))_{i,j=1}^2$  – матрица параметров, её элементы  $m_{ij}(\mu) \in C_{\mu \in \mathbf{R}^m}^0$  непрерывны по компонентам вектора  $\mu \in \mathbf{R}^m$ ,  $\|\mu\| = \max_{i=1,m} \{|\mu_i|\}$ ,  $M(0) = 0_{22}$ ,  $E$  – единичная  $2 \times 2$ -матрица) в систему (1) вводится параметр

$\mu \in \mathbf{R}^m$ , затем системы с параметром преобразуется в нелинейный оператор, для которого доказано существование неподвижной точки. В зависимости от количества неподвижных точек получаем фокус, центр или центр-фокус. При этом на данный момент открыт вопрос о подборе оптимальном вида матрицы  $M$ , а также вопрос о зависимости количества неподвижных точек нелинейного оператора от вида матрицы  $M$ .

**Пример.** Рассмотрим следующую систему [4]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -x_1 - x_1^2. \end{cases} \quad (2)$$



Она имеет два состояния равновесия – точки  $O(0; 0)$  и  $A(-1; 0)$ , а также имеет общий интеграл  $\frac{x_2^2}{2} + \frac{x_1^2}{2} - \frac{x_1^3}{3} = C$ , имеющий замкнутые траектории при определенном выборе начальных условий  $\alpha_0 \in U(\delta_0) \setminus \{0_2\}$  (рис. 1.1), т.е. существует окрестность точки  $O(0; 0)$ , в которой существуют только замкнутые траектории системы (2) (другими словами  $O(0; 0)$  – локальный центр).

Выполним замену  $x = (E + M_1)y$ , где  $M_1 = \begin{pmatrix} 0 & \mu \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ , тогда система (2) примет вид

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = \mu y_1 + (\mu^2 + 1)y_2 + \mu(y_1 + \mu y_2)^2, \\ \dot{y}_2 = -y_1 - \mu y_2 + (y_1 + \mu y_2)^2. \end{cases} \quad (3)$$

Фазовые портреты системы (3) при некоторых значениях параметра  $\mu$  представлены на рисунках 1 – 4. При этом нетрудно убедиться, что при данном преобразовании  $x = (E + M_1)y$  особые точки  $O(0; 0)$  и  $A(-1; 0)$  являются инвариантными.

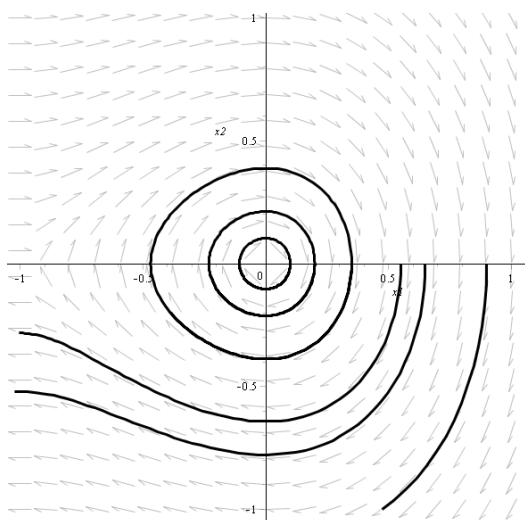


Рис. 1. Фазовый портрет системы (2)

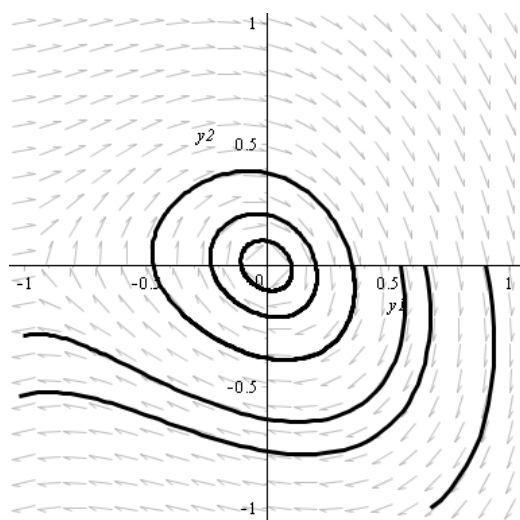


Рис. 2. Фазовый портрет системы (3) при  $\mu=0,2$

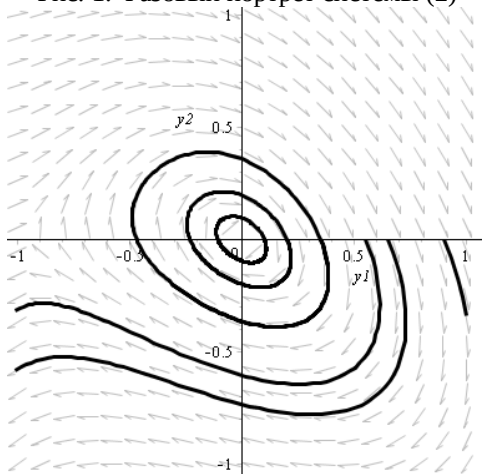


Рис. 3. Фазовый портрет системы (3) при  $\mu=0,5$

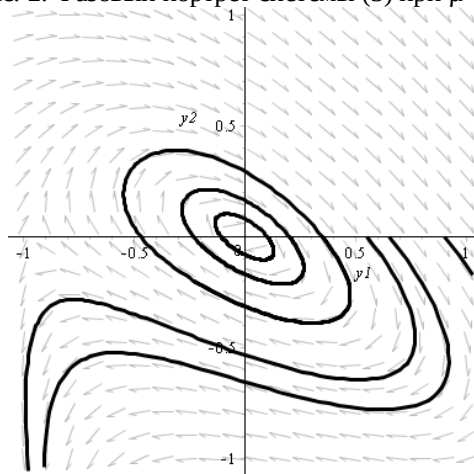


Рис. 4. Фазовый портрет системы (3) при  $\mu=0,8$

Выполним замену  $x = (E + M_2)y$ , где  $M_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \mu & 0 \end{pmatrix}$ , тогда система (2) примет вид

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = \mu y_1 + y_2, \\ \dot{y}_2 = -(1 + \mu^2)y_1 - \mu y_2 + y_1^2. \end{cases} \quad (4)$$

Фазовые портреты системы (3) при некоторых значениях параметра  $\mu$  представлены на рисунках 5 – 8. Следует обратить внимание на то, что для аффинного преобразования  $x = (E + M_2)y$  особая точка  $O(0; 0)$  является инвариантной, а особая точка  $A(-1; 0)$  переходит в точку  $A'(-1; \mu)$  и инвариантной не является.

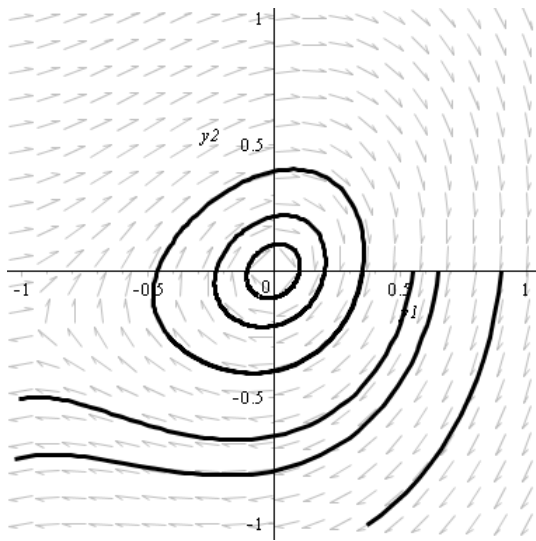


Рис. 5. Фазовый портрет системы (4) при  $\mu = -0,2$

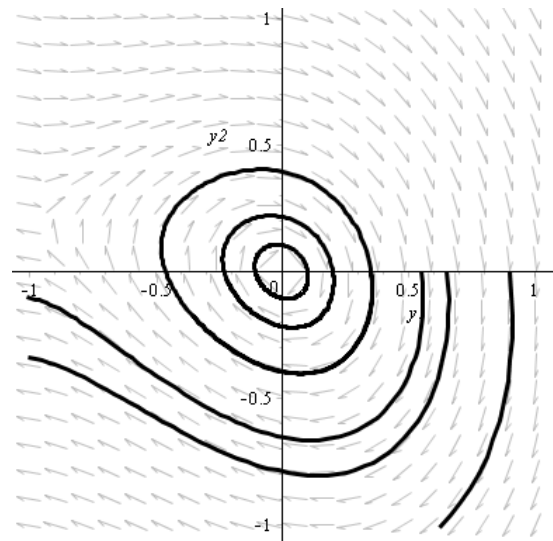


Рис. 6. Фазовый портрет системы (4) при  $\mu = 0,2$

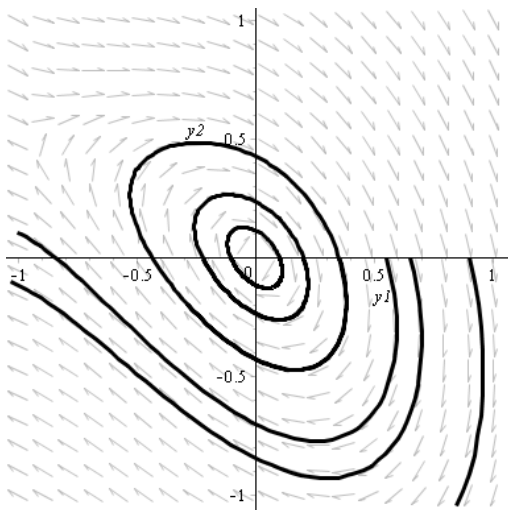


Рис. 7. Фазовый портрет системы (4) при  $\mu = 0,5$

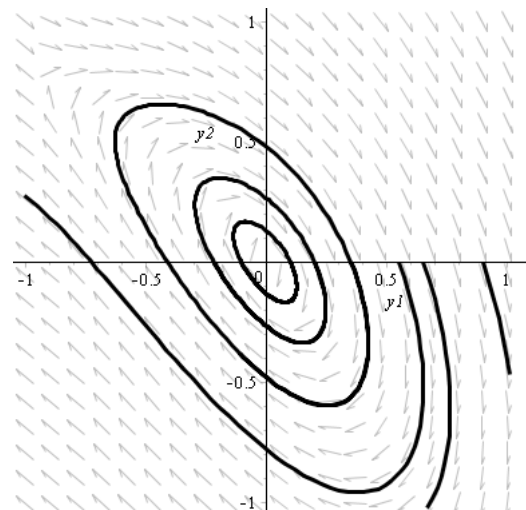


Рис. 8. Фазовый портрет системы (4) при  $\mu = 0,8$

Пример показывает, что рассмотренные аффинные преобразования не меняют топологической структуры фазового портрета. Однако, были рассмотрены самые простые преобразования размерности 1. Как показывают теоретические исследования, применение алгоритма из [2, 3] требует введения более высокой размерности и более сложной структуры.

### Библиографический список

1. Медведева Н. Б. Об аналитической разрешимости проблемы различения центра и фокуса // Тр. мат. ин-та им. В.А. Стеклова РАН. – 2006. – № 254. – С. 11–100.
2. Лискина Е. Ю. Достаточные условия существования центра у нелинейной динамической системы второго порядка в одном критическом случае // Итоги науки и техн. Сер. Современ. мат. и ее прил. Темат. обз. – 2022. – Т. 217. – С. 51–62. – DOI: <https://doi.org/10.36535/0233-6723-2022-217-51-62>
3. Лискина Е. Ю. Достаточные условия существования периодических решений системы дифференциальных уравнений с нелинейностью только четной степени в критическом случае // Дифференциальные уравнения и математическое моделирование : межвуз. сб. науч. тр. / отв. ред. С. С. Мамонов. – Вып. 3. – Рязань : Ряз. гос. ун-т имени С. А. Есенина, 2022. – С. 27–32.
4. Лискина Е. Ю. Примеры исследования сложного состояния равновесия нелинейной динамической системы // Дифференциальные уравнения и математическое моделирование : межвуз. сб. науч. тр. / отв. ред. С. С. Мамонов. – Вып. 4. – Рязань : Ряз. гос. ун-т имени С. А. Есенина, 2022. – С. 62–64.

УДК 517.925; ГРНТИ 27.29.17

## ОБ ОДНОМ ПРИЗНАКЕ УСТОЙЧИВОСТИ НУЛЕВОГО РЕШЕНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОБЫКНОВЕННЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

**В.В. Абрамов**

*Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина,  
Российская Федерация, Рязань, v.abramov@365.rsu.edu.ru*

*Аннотация.* В работе исследована нормальная система обыкновенных дифференциальных уравнений. Правая часть системы локально гладко зависит от фазовой переменной и от малого параметра, является периодической по независимой переменной. Предполагается, что при нулевом параметре линейное приближение системы имеет блочно-диагональную матрицу монодромии с ортогональным критическим блоком. Для проведения рассуждений использована оценка первого нелинейного приближения правого оператора монодромии. Получен достаточный коэффициентный признак устойчивости по параметру нулевого решения системы. Этот результат использован для исследования модели маятника с вибрирующей точкой подвеса и демпфером.

*Ключевые слова:* дифференциальные уравнения, колебания, малый параметр, устойчивость, оператор монодромии.

## ON ONE SIGN OF STABILITY OF THE ZERO SOLUTION OF A PERIODIC SYSTEM OF ORDINARY DIFFERENTIAL EQUATIONS

**V.V. Abramov**

*Ryazan State University named after S.A. Esenin,  
Russia, Ryazan, v.abramov@365.rsu.edu.ru*

*The summary.* A normal system of ordinary differential equations is investigated in this work. The right part of the system locally smoothly depends on the phase variable and on a small parameter, and is periodic in the independent variable. It is assumed that for a zero parameter, the linear approximation of the system has a block-diagonal monodromy matrix with an orthogonal critical block. To carry out the reasoning, an estimate of the norm of the first nonlinear approximation of the right monodromy operator is used. A sufficient coefficient criterion of stability is obtained for the parameter of the zero solution of the system. This result was used to study a pendulum model with a vibrating suspension point and a damper.

*Keywords:* differential equations, oscillations, small parameter, stability, monodromy operator.

Проблема исследования устойчивости решений периодической системы дифференциальных уравнений исследована в работах [1–6] для общего критического случая по линейному приближению, когда при нулевом значении параметра линейная система, соответствующую

щая исследуемой системе дифференциальных уравнений, устойчива по Ляпунову, но не асимптотически. В данной работе рассмотрим для линейного приближения системы специальный случай, который позволяет построить коэффициентный признак устойчивости, являющийся эффективным для практической проверки, например, с помощью компьютерных вычислений.

### Постановка задачи

Рассмотрим систему  $n$  дифференциальных уравнений вида систему

$$\dot{x} = A(t)x + g(t, x, \mu), \quad (1)$$

в которой  $\mu \in R^m$  – малый параметр, вектор-функция  $g(t, x, \mu)$  достаточно гладко зависит от  $(x, \mu)$  в окрестности точки  $(0_n, 0_m)$  и является  $\omega$ -периодической непрерывной по  $t$  при всех  $(x, \mu)$ ,  $g(t, 0_n, \mu) \equiv 0_n$ ,  $g'_x(t, 0_n, 0_m) \equiv 0_{nm}$ . Допустим,  $X(t)$  – фундаментальная матрица системы  $\dot{x} = A(t)x$ ,  $X(0) = E$ . Будем предполагать, что матрица монодромии  $X = X(\omega)$  имеет блочно-диагональную структуру  $X = \text{diag}[X_1, X_2]$ , в которой  $X_1$  – ортогональная матрица, то есть  $X_1^{-1} = X_1^T$ , евклидова норма матрицы  $X_2$  обладает оценкой  $\|X_2\|_2 < 1$ .

**Определение.** Нулевое решение системы вида (1)  $\mu$ -устойчиво (устойчиво по параметру), если для любого  $\varepsilon > 0$  существует  $\delta_1 > 0$  и множество  $M : 0_m \in M \subseteq R^m$ , при которых для всех  $t > 0$ ,  $a$  и  $\mu \in M$  из условий  $\|a\| < \delta_1$ ,  $\|\mu\| < \delta_1$  следует оценка  $\|x(t, a, \mu)\| < \varepsilon$ .

Заметим, что здесь и далее  $\|\cdot\|$  – какая-либо векторная норма.

Пусть  $x(t, a, \mu)$ ,  $x(0, a, \mu) = a$  – решение системы (1). Так как при  $(x, \mu)$  из окрестности точки  $(0_n, 0_m)$  система (1) близка к линейной, то при любых  $a$  и  $\mu$ , удовлетворяющих условиям  $\|a\| < \delta$ ,  $\|\mu\| < \delta$ ,  $\delta$  – достаточно малое число, определен правый оператор монодромии  $Ua : a \rightarrow x(\omega, a, \mu)$  [7, С. 131]. Тогда свойство устойчивости нулевого решения системы (1) можно установить на основе оценки степеней оператора монодромии [1].

**Лемма 1.** Решение  $x \equiv 0_n$  системы (1)  $\mu$ -устойчиво тогда и только тогда, когда для любого  $\varepsilon > 0$  существуют такие  $\delta_1 : 0 < \delta_1 \leq \delta$  и  $M : 0_m \in M \subseteq R^m$ , что для всех  $r \in N$ ,  $a : \|a\| < \delta_1$  и  $\mu \in M : \|\mu\| < \delta_1$  справедлива оценка  $\|x(r\omega, a, \mu)\| < \varepsilon$

Необходимость условия леммы 1 следует непосредственно из определения устойчивости по параметру. Достаточность устанавливается по аналогии с доказательством леммы 9.1 из монографии [8].

Применив лемму 1 и метод математической индукции, нетрудно убедиться в справедливости следующего утверждения.

**Лемма 2.** Если существует такое  $\delta_1 : 0 < \delta_1 \leq \delta$ , что для всех  $a : \|a\| < \delta_1$  и  $\mu \in M : \|\mu\| < \delta_1$  имеет место оценка  $\|x(\omega, a, \mu)\| < \delta_1$ , то решение  $x \equiv 0_n$  системы (1)  $\mu$ -устойчиво.

**Задача.** Определить условия  $\mu$ -устойчивости нулевого решения системы (1).

Решим поставленную задачу на основе леммы 2.

**Основной результат**

По свойствам системы (1) справедливо равенство вида

$$\begin{aligned} x(\omega, a, \mu) &= X \left( a + \int_0^{\omega} X^{-1}(t) g(t, x(t, a, \mu), \mu) dt \right) = \\ &= X(a + f(a, \mu) + \varphi(a, \mu) + \psi(a, \mu)) = Xp(a, \mu), \end{aligned} \quad (2)$$

в котором  $p(0_n, \mu) \equiv 0_n$ ,  $Xf(a, \mu)$  – главное однородное приближение правого оператора монодромии в виде вектор-формы от  $a$  и от  $\mu$ ,  $f(\alpha a, \beta \mu) = \alpha^k \beta^s f(a, \mu)$ ,  $s \geq 0$ ,  $k + s > 1$ ,  $\lim_{\alpha \rightarrow 0} \alpha^{-(k+s)} \|\varphi(\alpha a, \alpha \mu)\| \equiv 0$ ,  $\lim_{\beta \rightarrow 0} \beta^{-s} \|\psi(a, \beta \mu)\| \equiv 0$ . Далее систему (1), для которой получено разложение вида (2) будем называть системой (1)–(2).

**Теорема.** Если при некотором разложении  $f(a, \mu) = F(a, \mu)a$  для матрицы  $F(a, \mu) = [f_{ij}(a, \mu)]$  существует такое значение  $\mu = \mu_0$ ,  $\|\mu_0\| = 1$ , что при всех  $\lambda \in R^n$ ,  $\|\lambda\|_2 = 1$  выполняются условия:  $2f_{ii}(\lambda, \mu_0) + \sum_{j=1}^n |f_{ij}(\lambda, \mu_0) + f_{ji}(\lambda, \mu_0)| \leq -q_i < 0$ ,  $i = \overline{1, n}$ , то решение  $x \equiv 0_n$  системы (1)–(2)  $\mu$ -устойчиво.

**Доказательство.** В равенстве (2) допустим  $f(a, \mu) = F(a, \mu)a$ , кроме того произвольным образом выберем разложения  $\varphi(a, \mu) = \Phi(a, \mu)a$ ,  $\psi(a, \mu) = \Psi(a, \mu)a$ . При этом в силу аналитической эквивалентности норм выполняются условия  $\lim_{\alpha \rightarrow 0} \alpha^{-(k-1+s)} \|\Phi(\alpha a, \alpha \mu)\|_2 \equiv 0$ ,  $\lim_{\beta \rightarrow 0} \beta^{-s} \|\Psi(a, \beta \mu)\|_2 \equiv 0$ .

Заметим, что евклидова норма вектора  $y$  определяется по формуле  $\|y\|_2 = \sqrt{y^T y}$ , при этом  $\|Y\|_2 = \sqrt{\rho(Y^T Y)}$  – согласованная с ней норма матрицы  $Y$ , где  $\rho(Y^T Y)$  – спектральный радиус матрицы  $Y^T Y$ . Так как по свойству системы (1) выполняются условия:  $X = \text{diag}[X_1, X_2]$ ,  $X_1^{-1} = X_1^T$  и  $\|X_2\|_2 < 1$ , то  $\|X\|_2 = 1$ . Тогда из равенства (2) следует оценка

$$\|x(\omega, a, \mu)\|_2 \leq (\|E + F(a, \mu)\|_2 + \|\Phi(a, \mu)\|_2 + \|\Psi(a, \mu)\|_2) \|a\|_2. \quad (3)$$

Без ограничения общности рассуждений можно предполагать, что при  $\|a\|_2 < \delta$ ,  $\|\mu\| < \delta$  выполняется неравенство

$$\|E + F(a, \mu) + \Phi(a, \mu) + \Psi(a, \mu)\|_2 < 2. \quad (4)$$

Далее будем предполагать:  $\mu \in M = \{\mu = \beta \mu_0, \beta > 0\}$ ;  $a = \alpha \lambda$ ,  $\alpha > 0$ ,  $\|\lambda\|_2 = 1$ . Допустим,  $\|Y\|_\infty = \max_i \sum_j |y_{ij}|$  – строчная норма матрицы  $Y = [y_{ij}]$ . По условию теоремы справедлива оценка

$$\begin{aligned}
& \left\| \left[ E + F(a, \mu) \right]^T \left[ E + F(a, \mu) \right] \right\|_{\infty} \leq \\
& \leq \left\| E + \alpha^{k-1} \beta^s \left[ F^T(\lambda, \mu_0) + F(\lambda, \mu_0) \right] \right\|_{\infty} + \left( \alpha^{k-1} \beta^s \right)^2 \left\| F^T(\lambda, \mu_0) F(\lambda, \mu_0) \right\|_{\infty} \leq \quad (5) \\
& \leq 1 - \left( \alpha^{k-1} \beta^s \right) q + \left( \alpha^{k-1} \beta^s \right)^2 \left\| F^T(\lambda, \mu_0) F(\lambda, \mu_0) \right\|_{\infty},
\end{aligned}$$

в которой  $q = \min_{1 \leq i \leq n} \{q_i\}$ . Произвольным образом выберем  $q_0: 0 < q_0 < q$ . В силу оценки (5) подберем число  $\delta_1: 0 < \delta_1 \leq \delta$  так, чтобы при  $\alpha < \delta_1, \beta < \delta_1$  было справедливо неравенство

$$\left\| \left[ E + F(a, \mu) \right]^T \left[ E + F(a, \mu) \right] \right\|_{\infty} \leq 1 - \left( \alpha^{k-1} \beta^s \right) q_0. \quad (6)$$

Так как спектральный радиус матрицы – это нижняя грань множества ее всевозможных норм [9], то из неравенства (6) следует оценка

$$\rho \left( \left[ E + F(a, \mu) \right]^T \left[ E + F(a, \mu) \right] \right) \leq \left\| \left[ E + F(a, \mu) \right]^T \left[ E + F(a, \mu) \right] \right\|_{\infty} \leq 1 - \left( \alpha^{k-1} \beta^s \right) q_0.$$

Тогда существует число  $b > 0$ , при котором

$$\left\| E + F(a, \mu) \right\|_2 \leq 1 - \left( \alpha^{k-1} \beta^s \right) b \quad (7)$$

для всех  $\alpha < \delta_1$  и  $\beta < \delta_1$ .

Так как  $\lim_{\alpha \rightarrow 0} \alpha^{-(k-1+s)} \left\| \Phi(\alpha a, \alpha \mu) \right\|_2 \equiv 0$ , то существует такое  $\delta_2: 0 < \delta_2 \leq \delta_1$ , что

$$\left\| \Phi(a, \mu) \right\|_2 \leq \left( \alpha^{k-1} \beta^s \right) b/2 \quad (8)$$

при  $\|a\|_2 < \delta_2$  и  $\|\mu\| < \delta_2$ . Так как  $\lim_{\beta \rightarrow 0} \beta^{-s} \left\| \Psi(a, \beta \mu) \right\|_2 \equiv 0$ , то можно подобрать  $\delta_3: 0 < \delta_3 \leq \delta_2$ , при котором из условий  $\delta_2/2 \leq \|a\|_2 < \delta_2$  и  $\|\mu\| < \delta_3$  следует справедливость оценки

$$\left\| \Psi(a, \mu) \right\|_2 \leq \left( \alpha^{k-1} \beta^s \right) b/2. \quad (9)$$

Итак, при  $\delta_2/2 \leq \alpha < \delta_2$  и  $\beta < \delta_3$  в силу неравенств (3), (7)–(9) имеет место оценка

$$\left\| x(\omega, a, \mu) \right\|_2 < \|a\|_2 < \delta_2; \quad (10)$$

при  $\alpha < \delta_2/2$  и  $\beta < \delta_3$  в силу неравенств (3) и (4) имеем

$$\left\| x(\omega, a, \mu) \right\|_2 < 2 \|a\|_2 < \delta_2. \quad (11)$$

Из оценок (10) и (11) следует, что выполняется условие леммы 2. Значит, решение  $x \equiv 0_n$  системы (1)–(2) устойчиво по параметру. Теорема доказана.

### Приложение к модели маятника

Исследуем движения с малой амплитудой и скоростью, определяемые моделью физического маятника с вибрирующей точкой подвеса  $\ddot{x} + \sin x + p_1 \cos \beta t \sin x + p_2 \dot{x} = 0$  [10]. Дополнительно предположим наличие демпфера – специальной нелинейной составляющей силы сопротивления, зависящей от скорости движения. Рассмотрим в окрестности нулевого положения равновесия соответствующую систему вида (1)

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -x_2, \\ \dot{x}_2 = x_1 + (\sin x_1 - x_1) + \mu_1^2 \cos \beta t \sin x_1 + \mu_2^2 x_2 - dx_1^2 x_2 + \gamma(x_1) x_2, \end{cases} \quad (12)$$

в которой  $x_1$  – угол отклонения маятника от положения равновесия;

$$\mu_1^2 = p_1 = \frac{rv^2}{g};$$

$$\mu_2^2 = p_2 = \frac{\delta}{\sqrt{mag(j+ma^2)}};$$

$$\beta = v \sqrt{\frac{(j+ma)^2}{mag}};$$

$g$  – ускорение свободного падения;

$j$  – момент инерции маятника относительно оси, проходящей через центр масс перпендикулярно плоскости колебаний;

$\delta$  – коэффициент вязкого трения среды, в которой движется маятник;

$m$  – масса маятника;

$a$  – длина маятника;

$r$  – амплитуда колебаний точки подвеса;

$v$  – частота колебаний точки подвеса;

слагаемое  $\mu_1^2 \cos \beta t \sin x_1$  – приведенная движущая сила, действующая в связи с колебаниями точки подвеса;

слагаемое  $\mu_2^2 x_2 - dx_1^2 x_2 + \gamma(x_1) x_2$  – демпфер;

$d > 0$  – параметр, который условно назовем коэффициентом демпфирования;

функция  $\gamma(x_1)$  удовлетворяет условию  $\lim_{x_1 \rightarrow 0} |x_1|^{-2} |\gamma(x_1)| = 0$ .

Определим характер движений, определяемых моделью (12), предполагая, что величины  $r$  и  $\delta$  могут быть выбраны произвольно малыми, то есть  $\mu = (\mu_1, \mu_2)$  – малый параметр.

Правая часть системы (12) имеет по  $t$  период  $\omega = 2\pi/\beta$ . Допустим,  $\beta \neq 1$ . Сопоставляя системы (1) и (12) получим, что  $A = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ . Следовательно  $X = \begin{bmatrix} \cos \omega & -\sin \omega \\ \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix}$  – матрица монодромии при  $\mu = 0_2$ . В рассматриваемом случае  $\det[X - E] \neq 0$ . Значит, решения  $x(t, a, \mu)$  системы (12) при достаточно малых  $\|a\| \neq 0$  и  $\|\mu\| \neq 0$  не являются периодическими [3, 4].

Матрица монодромии для системы (12) имеет разложение следующего вида

$$T(\mu) = X [E + B_1(\mu) + B_2(\mu)],$$

в котором  $B_1(\mu) = \int_0^{\omega} X^{-1}(t) p'_a(X(t)a, \mu) dt$ ,  $p(x, \mu) = \begin{pmatrix} 0 \\ \mu_1^2 x_1 \cos \beta t + \mu_2^2 x_2 \end{pmatrix}$ ,  $\lim_{\mu \rightarrow 0} \mu^{-2} \|B_2(\mu)\| = 0$ .

Вычислим матрицу

$$B_1(\mu) = \int_0^{\omega} \begin{bmatrix} \mu_1^2 \cos \beta t \sin t \cos t + \mu_2^2 \sin^2 t & \mu_2^2 \sin t \cos t - \mu_1^2 \cos \beta t \sin^2 t \\ \mu_1^2 \cos \beta t \cos^2 t + \mu_2^2 \sin t \cos t & \mu_2^2 \cos^2 t - \mu_1^2 \cos \beta t \sin t \cos t \end{bmatrix} dt =$$

$$= \begin{bmatrix} 1 + 2\mu_1^2 h_1(\beta) + \mu_2^2 (\pi - h_2(\beta)/4)/\beta & \mu_1^2 \sin(4\pi/\beta) + 1/2 \mu_2^2 \sin^2(2\pi/\beta) \\ \mu_1^2 \sin(4\pi/\beta) + 1/2 \mu_2^2 \sin^2(2\pi/\beta) & 1 - 2\mu_1^2 h_1(\beta) + \mu_2^2 (\pi + h_2(\beta)/4)/\beta \end{bmatrix},$$

$h_1(\beta) = \sin^2(2\pi/\beta)/(4 - \beta^2)$ ,  $h_2(\beta) = \beta \sin(4\pi/\beta)$ . Заметим, что  $\lim_{\beta \rightarrow 2} h_1(\beta) = 0$ . Далее рас-

смотрим случай  $\beta = 2$ . При этом матрица  $X[E + B_1(\mu)] = \begin{bmatrix} -1 - \mu_2^2 \pi / 2 & -\mu_1^2 \pi / 4 \\ -\mu_1^2 \pi / 4 & -1 - \mu_2^2 \pi / 2 \end{bmatrix}$  имеет

собственные значения  $-1 - \mu_2^2 \pi / 2 \pm \mu_1^2 \pi / 4$ . Поэтому  $\rho(T(\mu)) > 1$  при малых  $\mu \neq 0_2$ . Итак, нулевое решение системы (12) неустойчиво по Ляпунову по линейному приближению [8].

Для оператора монодромии системы (12) построим разложение вида (2), в котором

выберем  $f(a, \mu) = \int_0^{\omega} X^{-1}(t) \bar{g}(X(t)a, \mu) dt$ , где  $\bar{g}(x, \mu) = \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{1}{6} x_1^3 - dx_1^2 x_2 \end{pmatrix}$ . Проведя вычис-

ления, получим  $f(a, \mu) = F(a)a$ , где  $F(a) = [f_{ij}(a)] = \frac{\pi}{16} \|a\|_2 \begin{bmatrix} -2d & 1 \\ -1 & -2d \end{bmatrix}$ . При  $\|a\|_2 = 1$  по-

лучим  $2f_{11}(\lambda) + |f_{12}(\lambda) + f_{21}(\lambda)| = 2f_{22}(\lambda) + |f_{12}(\lambda) + f_{21}(\lambda)| = -\pi d / 4$ . Таким образом, по доказанной выше теореме нулевое решение системы (12) устойчиво по параметру, то есть решения системы (12) ограничены при малых значениях начальных значений и параметра.

Результаты локального исследования системы (12) для  $t \in [0, 900]$  проиллюстрированы на рисунках 1, 2 с помощью программы Maple.

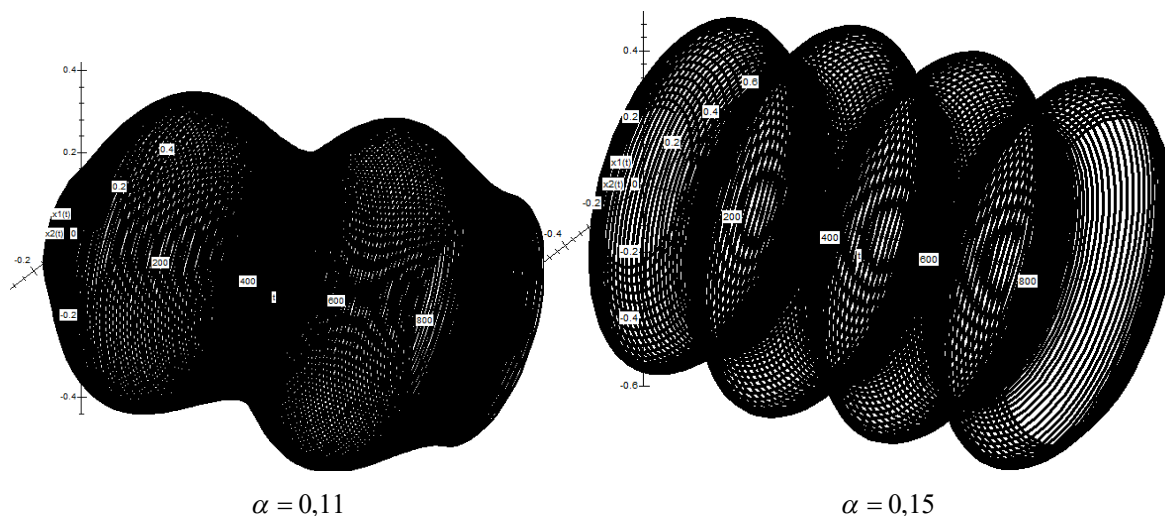


Рис. 1. Интегральная кривая решения с начальным значением  $a = \alpha \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$  системы (12) при  $\mu = \alpha \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$ ,  $d = 0,4$



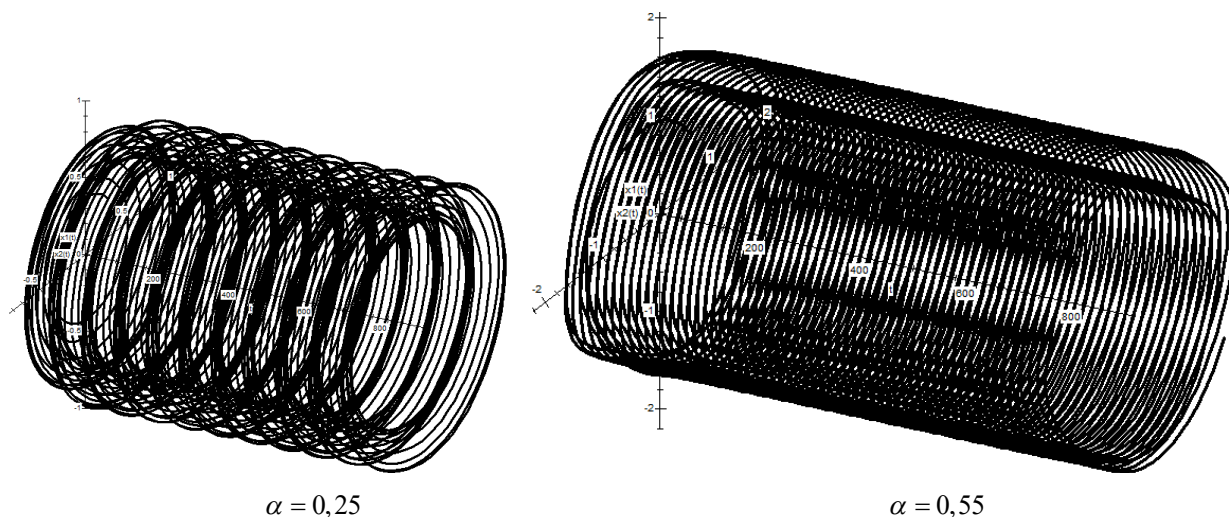
 $\alpha = 0,25$  $\alpha = 0,55$ 

Рис. 2. Интегральная кривая решения с начальным значением  $a = \alpha \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$  системы (12) при  $\mu = \alpha \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$ ,  $d = 0,4$

### Вывод

При  $\beta = 2$  в малой окрестности тривиального положения равновесия модели (12) наблюдаются незатухающие негармонические колебания, если амплитуда колебаний точки подвеса и коэффициент вязкого трения достаточно малы.

### Библиографический список

1. Абрамов, В.В. Устойчивость нулевого решения периодической системы дифференциальных уравнений с малым параметром / В.В. Абрамов // Журнал СВМО. – 2010. – Т. 12. – № 4. – С. 49–54.
2. Абрамов, В.В. Признаки устойчивости нулевого решения системы дифференциальных уравнений с малым параметром / В.В. Абрамов // Математика и естественные науки. Теория и практика: межвуз. сб. науч. тр. – Вып. 13. – Ярославль: Издат. дом ЯГТУ, 2018. – С. 3–6.
3. Абрамов, В.В. К задаче об устойчивости малого периодического решения / В.В. Абрамов // Итоги науки и техники. Современная математика и ее приложения. Тематические обзоры. – 2018. – Т. 148. – С. 3–9.
4. Abramov, V.V. On stability of small periodic solutions / V.V. Abramov // Journal of Mathematical Sciences. – 2020. – Т. 248, № 4. – P. 375–381.
5. Абрамов, В.В. К проблеме устойчивости нулевого решения периодической системы обыкновенных дифференциальных уравнений / В.В. Абрамов // Итоги науки и техники. Современная математика и ее приложения. Тематические обзоры. – 2022. – Т. 216. – С. 3–11.
6. Abramov, V.V. Parameter stability under permanent perturbations / V.V. Abramov, S.A. Belman, E.Y. Liskina // Journal of Mathematical Sciences. – 2022. – Т. 262, № 6. – P. 773–778.
7. Бибииков, Ю.Н. Курс обыкновенных дифференциальных уравнений / Ю.Н. Бибииков // М.: Высшая школа. – 1991.
8. Красносельский, М.А. Оператор сдвига по траекториям дифференциальных уравнений / М.А. Красносельский // М.: Наука. – 1966.
9. Хорн, Р.А. Матричный анализ / Р.А. Хорн, Ч.Р. Джонсон // М.: Мир. – 1989.
10. Морозов, А.Д. К задаче о маятнике с вибрирующей точкой подвеса / А.Д. Морозов // Прикладная математика и механика. – 1995. – Т. 59. – Вып. 4. – С. 590–598.

УДК 517.928.4, 517.928.7, 51-76, 51-77; ГРНТИ 27.29.17, 27.29.23, 27.35

## **ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ БОЛЬШИХ РЕШЕНИЙ ОБЫКНОВЕННЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ДИНАМИКИ ИНФЕКЦИОННЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ**

**И.М. Купцов<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Рязанский государственный университет имени С. Есенина, Россия, Рязань,

<sup>2</sup>Яндекс, Россия, Москва, [kuptsov.im@gmail.com](mailto:kuptsov.im@gmail.com)

*Аннотация.* Рассмотрены вопросы совместного моделирования процессов динамики инфекционных заболеваний и распространения информации о них в социальных сетях. Структурные связи между объектами моделирования формализованы в виде систем обыкновенных дифференциальных уравнений.

*Ключевые слова:* математическое моделирование, пандемия, распространение информации, система обыкновенных дифференциальных уравнений.

## **ON MODELING THE DYNAMICS OF INFECTIOUS DISEASES AND THE DISSEMINATION OF INFORMATION**

**I.M. Kuptsov<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Ryazan State University named after S. Yesenin, Russia, Ryazan,

<sup>2</sup>Yandex, Russia, Moscow, [kuptsov.im@gmail.com](mailto:kuptsov.im@gmail.com)

*Abstract.* The issues of joint modeling of the dynamics of infectious diseases and the dissemination of information about them in social networks are considered. The structural connections between the modeling objects are formalized in the form of systems of ordinary differential equations.

*Keywords:* mathematical modeling, pandemic, information dissemination, system of ordinary differential equations.

Многие современные исследования демонстрируют возрастающий интерес к взаимодействию динамики совместного распространения инфекционных заболеваний и информации, связанной с соответствующими заболеваниями. Как показала недавняя пандемия COVID-19, не смотря на прогресс медицины, создание новых методов лечения, вакцин и лекарств, вероятности вспышек ранее известных инфекционных заболеваний, вероятности возникновения новых их штаммов и вероятности появления даже новых инфекционных заболеваний остаются очень высокими. В этой связи становится понятным, что поведение человека при возникновении риска заражения существенно меняет как вероятность заражения данного конкретного человека, так и динамику распространения эпидемии в целом. Примерами могут служить то, как мы взаимодействуем друг с другом, когда боеем, разрываем ли мы социальные связи во время инфекции, что, по нашему мнению, мы знаем о рисках для здоровья и как мы принимаем меры на основе этой информации [1, 2]. А так как информация существенно влияет на поведение человека, то естественно предположить, что информация о том или ином заболевании будет влиять на скорость и структуру его распространения. В свою очередь, само заболевание будет вызывать распространение информации о нём.

В настоящее время уже существует достаточно много математических моделей, описывающих как динамику инфекций, так и динамику распространения информации (особенно это характерно для социальных сетей) [3-5]. Однако математических моделей, изучающих совместную динамику распространения информации и заболеваний пока ещё не так много (см., например, литературу в [1, 2]). Тем не менее данное направление математического моделирования в настоящий момент бурно развивается и уже построены достаточно интересные математические модели, с помощью которых проигрываются различные сценарии динамики заболеваний (в том числе и неинфекционных) в зависимости от осведомлённости потенциальных и реальных больных [1, 2, 6]. В тоже время, например, известно о достаточно многочисленных случаях так называемых ковид-диссидентах, то есть людей, обладающих необходимой информацией, но отказывающихся применять профилактические меры по за-

щите от пандемии COVID-19 [7, с. 72]. Таким образом, индивидуальная реакция людей на информацию о эпидемиологическом развитии инфекции представляет собой сложный психосоциальный процесс, который очень трудно моделировать и прогнозировать. В частности, большое значение в принятии решений человек уделяет достоверности информации, причём здесь большую роль играет доверие узлам распространения информации (в частности, государственным органам, прессе, интернету, социальным сетям и т.д.). Однако, как отмечает большинство исследователей динамики совместного распространения заболеваний и информации о них [1, 2, 7], максимально подробная и честная информация о развитии эпидемии позволяет уменьшить количество людей, поведенчески пренебрегающих своим здоровьем, тем самым позволяя воздействовать на уменьшение масштабов эпидемий.

Совместное рассмотрение моделей распространения информации и эпидемии математически оправдано тем, что эти модели очень схожи. По сути, они описываются одними и теми же системами дифференциальных уравнений [3, 5], но с разными переменными. С математической точки зрения обособленное изучение этих систем дифференциальных уравнений ничем не отличается, к ним применимы одни и те же количественные и качественные методы исследования.

Рассмотрим систему обыкновенных дифференциальных уравнений, являющейся моделью распространения инфекционного заболевания:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \varepsilon_3 x_4 - \varepsilon_1 x_1 x_2 - \varepsilon_2 x_1 x_3, \\ \dot{x}_2 = -(\varepsilon_4 + \varepsilon_5 + \varepsilon_6) x_2 + \varepsilon_1 x_1 x_2 + \varepsilon_2 x_1 x_3, \\ \dot{x}_3 = \varepsilon_4 x_2 - (\varepsilon_7 + \varepsilon_8) x_3, \\ \dot{x}_4 = \varepsilon_5 x_2 + \varepsilon_7 x_3 - \varepsilon_3 x_4, \\ \dot{x}_5 = \varepsilon_6 x_2 + \varepsilon_8 x_3. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь  $x_1$  - количество лиц, потенциально подверженных воздействию инфекции (люди, не имеющие иммунитета);

$x_2$  - количество лиц, находящихся в латентной «стадии» (скрытно больные: включает и бессимптомно больных, и скрывающих заболевание, и вообще всех тех, кто на данный момент времени не имеет официального диагноза);

$x_3$  - количество лиц, заболевших официально (имеющих официальный диагноз);

$x_4$  - количество лиц, выздоровевших после инфекции;

$x_5$  - количество лиц, умерших в результате инфекции (включает и тех, кто болел с официальным диагнозом, и тех, кто не обращался к медицинской помощи);

$\varepsilon_1$  - вероятность контакта здорового человека со скрытно больным и, одновременно, вероятность заражения во время этого контакта;

$\varepsilon_2$  - вероятность контакта здорового человека с официально больным и, одновременно, вероятность заражения во время этого контакта;

$\varepsilon_3$  - вероятность повторного заражения;

$\varepsilon_4$  - коэффициент выявления заболевших (вероятность перехода из скрытно больного в официально больного);

$\varepsilon_5$  - вероятность выздоровления скрытно больного;

$\varepsilon_6$  - вероятность смерти скрытно больного;

$\varepsilon_7$  - вероятность выздоровления официально больного;

$\varepsilon_8$  - вероятность смерти официально больного, минимальный период моделирования один день;

$\dot{x} = \frac{dx}{dt}$ , все параметры  $\varepsilon_i$  – постоянные скалярные величины.

Для практической реализации системно-динамической модели, описанной системой (1), использовались архивные статистические данные о распространении COVID-19 в Рязанской области в 2020 году [8]. Процесс имитационного моделирования с системно-динамической моделью (1) осуществлялся на имитационной платформе. Кроме фазовых переменных системы (1) с помощью разработанной имитационной модели отслеживалась отдельно динамика  $x_6$  - количества лиц, выздоровевших и имевших при этом официальный диагноз COVID-19, а также динамика  $x_7$  - количества лиц, умерших с указанием официальной причины смерти именно COVID-19. Проигрывались различные сценарии с различными значениями параметров  $\varepsilon_i$ . В результате удалось установить, что оптимальный период моделирования составляет 50 дней. Внутри этого интервала параметры  $\varepsilon_i$  можно считать постоянными, поскольку удаётся добиться приемлемой точности модели: коэффициенты детерминации с реальными данными составляют не менее 0,89; 0,79 и 0,52 соответственно для переменных  $x_3$ ,  $x_7$  и  $x_6$  (уровень статистической значимости не более 0,04) [9, 10].

Для качественного анализа фазовых траекторий системы (1) применялись методы из [11, 12]. Таким образом, в результате комбинирования качественных и количественных методов удалось установить те параметры, которые влияют на скорость распространения инфекции и, следовательно, в определённом смысле появилась возможность управлять её развитием.

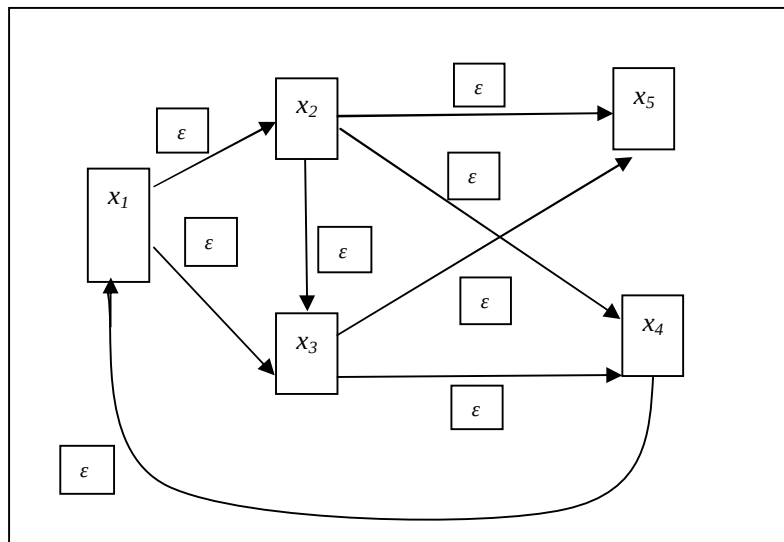


Рис. 1. Системная диаграмма динамической модели распространения пандемии, описываемой системой дифференциальных уравнений (1)

На более длинных временных интервалах (более 50 дней) приемлемой точности модели достигнуть пока не удалось. По-видимому, в случае более длинных временных интервалов параметры уже зависят от переменной  $t$ , а в правых частях системы (1) возникают более сложные нелинейности. Поэтому для более длинных временных интервалов эффективными являются качественные и асимптотические методы изучения фазовых траекторий системы (1), в частности, методы обнаружения аттракторов и вообще инвариантных множеств, а также соответствующих значений параметров [13]. Кроме того, точность и временная продолжительность моделирования динамики пандемии может быть увеличена за счёт одновременного рассмотрения модели распространения информации о пандемии.

Рассмотрим систему обыкновенных дифференциальных уравнений, являющейся моделью распространения информации при наличии двух противоборствующих «идей» (см., например, [3]):

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = (v_1 - v_8 - v_9)y_1 + v_4y_2 + v_5y_3 - y_1/(y_1 + y_2 + y_3)(v_6y_2 + v_7y_3), \\ \dot{y}_2 = v_8y_1 - v_4y_2 + v_6y_1y_2/(y_1 + y_2 + y_3) + y_2y_3/(y_2 + y_3)(v_3 - v_2), \\ \dot{y}_3 = v_9y_1 - v_5y_3 + v_7y_1y_3/(y_1 + y_2 + y_3) + y_2y_3/(y_2 + y_3)(v_2 - v_3). \end{cases} \quad (2)$$

Здесь  $y_1$  – количество лиц, подверженных информационному воздействию;

$y_2$  – количество лиц, принявших 1 распространяемую идею;

$y_3$  – количество лиц, принявших 2 распространяемую идею;

$v_1$  – коэффициент увеличения количества лиц, подверженных информационному воздействию (скорость распространения информации в социуме);

$v_2$  – вероятность принятия 2 идеи вместо 1 идеи;

$v_3$  – вероятность принятия 2 идеи вместо 1 идеи;

$v_4$  – вероятность забывания 1 идеи;

$v_5$  – вероятность забывания 2 идеи;

$v_6$  – вероятность принятия 1 идеи при непосредственном контакте с носителем 1 идеи;

$v_7$  – вероятность принятия 2 идеи при непосредственном контакте с носителем 2 идеи;

$v_8$  – вероятность принятия 1 идеи при опосредованном влиянии (средства массовой информации, органы государственной власти и т.п.);

$v_9$  – вероятность принятия 1 идеи при опосредованном влиянии (средства массовой информации, органы государственной власти и т.п.).

Все параметры  $v_i$  – постоянные скалярные величины. В данном случае под «1 идеей» понимается негативная конспирологическая информация о необходимости игнорирования и избегания профилактических мер по защите от пандемии, а под «2 идеей» – позитивная информация о необходимости применения профилактических мер по защите от пандемии. В работе [3] показана высокая эффективность модели, описываемой системой дифференциальных уравнений (2), как при агентном моделировании, так и при системно-динамическом моделировании на платформе Anylogic.

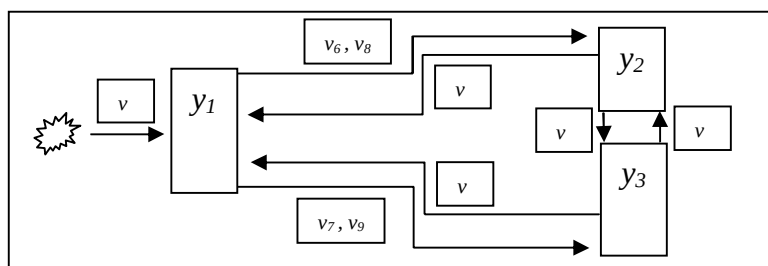


Рис. 2. Системная диаграмма динамической модели распространения информации о пандемии, описываемой системой дифференциальных уравнений (2)

Таким образом, дальнейшие перспективы исследования мы видим в совместном рассмотрении систем (1) и (2), что позволит увеличить точность моделирования. Для анализа фазовой «картины» траекторий совмещенной системы и обнаружения инвариантных множеств и далее будет применяться теория больших решений систем обыкновенных дифференциальных уравнений, основанная на результатах из [11, 14].

### Библиографический список

1. Nunner, H., Buskens, V. & Kretzschmar, M. A model for the co-evolution of dynamic social networks and infectious disease dynamics. - Comput Soc Netw, 2021, v.8 (19). - pp. 1-33. doi:10.1186/s40649-021-00098-9
2. Wang, Z., Xia, C. Co-evolution spreading of multiple information and epidemics on two-layered networks under the influence of mass media. - Nonlinear Dyn, 2020, v.102. - pp. 3039–3052. doi: 10.1007/s11071-020-06021-7
3. Minaev V., Vaiz E., Kuptsov M., Yablochnikov S., Vidov S. Modeling of information impacts on elements of onboard system. - 2018 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russia, 2018, pp. 1-5. doi: 10.1109/SOSG.2018.8350621

4. Yablochnikov S., Kuptsov M., Mahiboroda M. Modeling of Information Processes in Social Networks. – Information, 2021, v.12, 116. - pp. 1–18. doi: 10.3390/info12030116
5. Péni T., Csutak B., Szederkényi G. et al. Nonlinear model predictive control with logic constraints for COVID-19 management. – Nonlinear Dyn, 2022, v.102. - pp. 1965–1986. doi: 10.1007/s11071-020-05980-1
6. Tuson, M.; Harper, P.; Gartner, D.; Behrens, D. Understanding the Impact of Social Networks on the Spread of Obesity. - Int. J. Environ. Res. Public Health, 2023, v.20 (6451). - pp. 1-23. doi:10.3390/ijerph20156451
7. Общество и пандемия: опыт и уроки борьбы с COVID-19 в России. – Москва, 2020. ISBN 978-5-85006-256-9
8. Статистика развития пандемии коронавируса Covid-19 в Рязанской области [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://coronavirus-monitor.info/country/russia/ryazanskaya-oblast/>. – Дата доступа: 01.12.2022.
9. Куликов Д.А., Купцов М.И. Statest, - Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2023618893, 02.05.2023.
10. Стружанов Ф.Р., Яньков Я.В., Купцов М.И. Regression analysis, - Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2023661489, 31.05.2023.
11. Abramov V.V. On the branching of a large periodic solution of a system of differential equations with a parameter, - Journal of Mathematical Sciences, 2022, v. 262, №6. - pp. 767– 772, doi: 10.1007/s10958-022-05854-4.
12. Kuptsov M.I., Minaev V.A., Faddeev A.O., Yablochnikov S.L. On the stability of integral manifolds of a system of ordinary differential equations in the critical case. - Journal of Mathematical Sciences, 2022, vol. 262, №6. - pp. 825–834. doi: 10.1007/s10958-022-05861-5.
13. Firdaus Udawadia, George Leitmann, And Luca Lambertini. A dynamical model of terrorism, - Discrete Dynamics in Nature and Society, 2006, Article ID 85653. - pp. 1–32, doi: 10.1155/DDNS/2006/85653.
14. Абрамов В.В., Лискина Е.Ю. О ветвлении периодического решения квазилинейной системы обыкновенных дифференциальных уравнений, - Итоги науки и техники. Современная математика и ее приложения. Тематические обзоры, 2022, т. 217. - с. 3–10, doi: 10.36535/0233-6723-2022-217-3-10.

УДК 517.925.41, 33.053; ГРНТИ 27.29.17, 06.52.45

## **ОБ ОДНОЙ МОДЕЛИ ОДНОСЕКТОРНОЙ ЭКОНОМИКИ С ОГРАНИЧЕННЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ФАКТОРОВ**

**Д.В. Юдин, В.В. Абрамов**

*Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина,  
Российская Федерация, Рязань, d.yudin2008@stud.rsu.edu.ru, v.abramov@365.rsu.edu.ru*

*Аннотация.* Предложена модификация модели Солоу для односекторной экономики. Предполагается, что инвестиции влияют не только на динамику фондов, но и на динамику труда. Рассматривается случай ограниченной экономики, когда производственная функция имеет отрицательное значение при достаточно больших величинах производственных факторов. В качестве статической модели экономики выбрана кусочно-линейная производственная функция. При этих предположениях для экономики введена динамическая модель в виде автономной системы с переменной структурой на плоскости. Методами качественной теории дифференциальных уравнений найдены условия существования устойчивого положения равновесия экономики.

*Ключевые слова:* система дифференциальных уравнений на плоскости, переменная структура, кусочно-линейная система, положение равновесия, устойчивость, траектории, качественная теория, поле направлений, односекторная экономика, модель Солоу, производственная функция, факторы производства.

## **ABOUT ONE MODEL OF A SINGLE-SECTOR ECONOMY WITH LIMITED POSSIBILITIES FOR USING PRODUCTION FACTORS**

**D.V. Yudin, V.V. Abramov**

*Ryazan State University named after S.A. Esenin,  
Russia, Ryazan, d.yudin2008@stud.rsu.edu.ru, v.abramov@365.rsu.edu.ru*

*The summary.* A modification of the Solow model for a single-sector economy is proposed. It is assumed that investments affect not only the dynamics of funds, but also the dynamics of labor. The case of a limited economy is considered, when the production function has a negative value with sufficiently large values of production factors. A piecewise linear production function is cho-

sen as a static model of the economy. Under these assumptions, a dynamic model is introduced for the economy in the form of an autonomous system with a variable structure on the plane. Using the methods of the qualitative theory of differential equations, the conditions for the existence of a stable equilibrium position of the economy are found.

*Keywords:* system of differential equations on a plane, variable structure, piecewise linear system, equilibrium position, stability, trajectories, qualitative theory, direction field, one-sector economy, Solow model, production function, factors of production.

### Постановка задачи

Рассмотрим проблему моделирования односекторной экономики. В отличие от классических предположений модели Солоу – Свона [1], используя идею работы [2], будем предполагать, что инвестиции за счет валового продукта влияют не только на динамику фондов, но и на динамику труда. При этом модель односекторной экономики имеет вид нормальной автономной системы дифференциальных уравнений на плоскости

$$\begin{cases} \dot{K} = -\mu K + \lambda F(K, L), \\ \dot{L} = \nu L + (1 - \lambda)F(K, L), \end{cases} \quad (1)$$

в которой  $F(K, L)$  – производственная функция, определяющая валовой выпуск продукции в зависимости от факторов: основных фондов –  $K$  и труда –  $L$ ;

$\lambda, (1 - \lambda)$  – доли инвестиций на увеличение производственных факторов  $K$  и  $L$  в размерах  $\lambda F(K, L)$  и  $(1 - \lambda)F(K, L)$  соответственно, причём  $\lambda \in (0; 1]$ ;

$\mu \in (0; 1)$  – норма амортизации;

$\nu$  – темп роста труда.

Знак  $\nu$  не будем специально уточнять. Остальные константы далее положительны.

Традиционно модель Солоу и ее модификации используются для исследования экономического роста. Однако, проблема роста не актуальна для слабо изученного случая ограниченной экономики, если достаточно большие значения факторов производства невозможны. Для моделирования таких случаев используем идею из работы [3], но выберем модель с переменной структурой для производственной функции. Будем предполагать, что экономика ограничена следующими условиями

$$K \geq 0, L \geq 0, g(K, L) \leq 0, \quad (2)$$

иными словами, вне данной замкнутой и ограниченной области (далее будем называть её область 2, а остальную часть первой четверти – область 1) производственная функция становится отрицательной. В качестве модельного предположения допустим, что  $F(K, L)$  в системе (1) является аддитивной кусочно-линейной, то есть ее структура изменяется при переходах величин производственных факторов через некоторые критические значения определяемые уравнением прямой  $g(K, L) = 0$ , которые можно рассматривать в качестве максимальных значений факторов, эффективных для данной экономики. Допустим,

$$F(K, L) = \alpha K + \beta L, \quad \alpha = \begin{cases} -\alpha_1, g(K, L) > 0, \\ \alpha_2, g(K, L) < 0, \end{cases}, \quad \beta = \begin{cases} -\beta_1, g(K, L) > 0, \\ \beta_2, g(K, L) < 0, \end{cases} \quad (3)$$

где  $\alpha, \beta$  – маргинальные величины валового продукта по факторам  $K$  и  $L$  соответственно, а  $g(K, L) = \alpha K + \beta L - c = 0$  – линейная функция из условия (2), определяющая максимально допустимые значения основных фондов и труда, при которых валовой продукт растёт. (Здесь и далее индекс 2 соответствует коэффициентам системы (1) в области 2, а индекс 1 соответствует коэффициентам системы (1) в области 1.)

Естественно предположить, что кроме коэффициентов производственной функции свои значения могут изменять  $\mu$  и  $\nu$ , то есть

$$\mu = \begin{cases} \mu_1, g(K, L) > 0, \\ \mu_2, g(K, L) < 0, \end{cases} \quad \nu = \begin{cases} \nu_1, g(K, L) > 0, \\ \nu_2, g(K, L) < 0. \end{cases} \quad (4)$$

Для функционирования ограниченной экономики требуется существование устойчивого ненулевого ограниченного решения системы (1). Таким образом, возникает задача поиска условий существования устойчивого состояния равновесия.

### Исследование векторного поля системы дифференциальных уравнений

Запишем систему (1) в матричном виде

$$\begin{pmatrix} \dot{K} \\ \dot{L} \end{pmatrix} = D \begin{pmatrix} K \\ L \end{pmatrix}, \quad D = \begin{pmatrix} -\mu + \lambda\alpha & \lambda\beta \\ (1-\lambda)\alpha & \nu + (1-\lambda)\beta \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Допустим, значения  $K$  отмечаются на оси абсцисс, а значения  $L$  на оси ординат.

Произвольно выберем константу  $c_2 \in (0; c)$ . Рассмотрим отрезок  $A_2B_2$ , который задаётся пересечением прямых  $K = 0, L = 0, g_2(K, L) = aK + bL - c_2 = 0$  (см. рисунок 1). Используя систему (5) и теорему о производной сложной функции получим

$$\frac{dg_2}{dt} = \frac{\partial g_2}{\partial K} \cdot \frac{dK}{dt} + \frac{\partial g_2}{\partial L} \cdot \frac{dL}{dt} = a \cdot ((-\mu_2 + \lambda\alpha_2)K + \lambda\beta_2L) + b \cdot (((1-\lambda)\alpha_2)K + ((1-\lambda)\beta_2 + \nu_2)L).$$

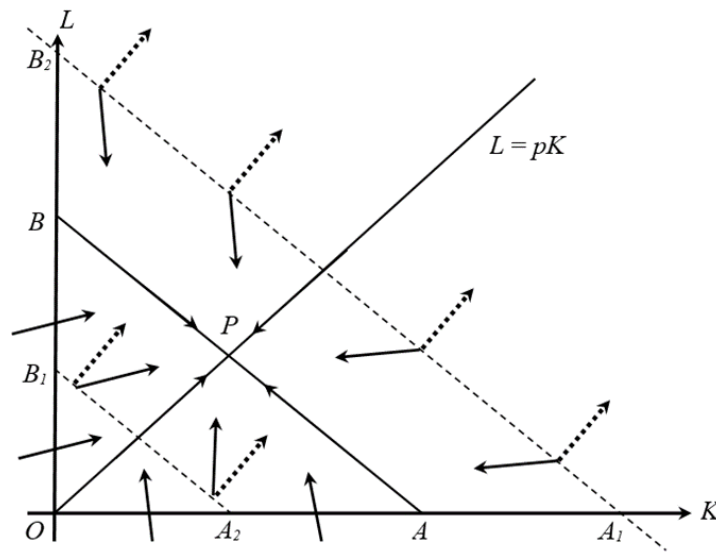


Рис. 1. Схема расположения векторного поля системы (1): сплошными стрелками обозначены направляющие векторы касательных к траекториям, пунктирными – нормаль к  $AB$

Допустим, справедливы неравенства

$$(a\lambda + b(1-\lambda))\alpha_2 - a\mu_2 > 0, \quad (a\lambda + b(1-\lambda))\beta_2 + b\nu_2 > 0. \quad (6)$$

Тогда  $\dot{g}_2 > 0$  на любом отрезке  $A_2B_2$ , лежащем в области (2) и параллельным отрезку  $AB$  (см. рисунок 1). Так как  $grad(g) = colon(a, b) > 0_2$ , то из условия  $\dot{g}_2 > 0$ , следует, что направляющий вектор  $colon(\dot{K}, \dot{L})$  касательной к траектории образуют с градиентом острый



угол. Значит, фазовые траектории системы (1) пересекают отрезок  $A_2B_2$  под острым углом, то есть выходят из любого треугольника  $A_2OB_2$ . Итак, точка  $O(0;0)$  – неустойчивое положение равновесия системы (1) в области 2.

Установим тип точки  $O(0;0)$  при коэффициентах системы (1) соответствующих области (2). Составим характеристическое уравнение  $k^2 - (trD_2)k + \det D_2 = 0$  для системы (4) при  $D = D_2$ . Предположим, что  $\det D_2 < 0$ , то есть справедливо неравенство

$$\lambda\alpha_2\nu_2 - \mu_2(\nu_2 + (1-\lambda)\beta_2) < 0. \quad (7)$$

Тогда характеристическое уравнение имеет два вещественных корня разных знаков, то есть точка  $O(0;0)$  – седло. Найдём уравнения сепаратрис в виде  $L = pK$ . В силу системы (1) получим  $p = \dot{L}/\dot{K}$ . Тогда уравнение для  $p$  имеет вид

$$\lambda\beta_2p^2 + (-\mu_2 + \lambda\alpha_2 - \nu_2 - (1-\lambda)\beta_2)p - (1-\lambda)\alpha_2 = 0. \quad (8)$$

Так как  $-\frac{(1-\lambda)\alpha_2}{\lambda\beta_2} < 0$ , то уравнение (8) имеет одно решение  $p > 0$ . Значит, неустойчивая сепаратриса седла лежит в первой четверти и пересекает  $AB$  в некоторой точке  $P$  (см. рисунок 1).

Из геометрических соображений при условии (7) касательные к траекториям (кроме, возможно, луча  $OP$ ) из области 2 образуют острые углы с векторами  $\overrightarrow{AP}$  и  $\overrightarrow{BP}$ .

Рассмотрим поведение траекторий системы (1) в области 1. Произвольно выберем константу  $c_1 > c$ . Рассмотрим отрезок  $A_1B_1$ , который задаётся пересечением прямых  $K = 0$ ,  $L = 0$ ,  $g_1(K, L) = aK + bL - c_1 = 0$  (см. рисунок 1). В силу системы (1) получим

$$\frac{dg_1}{dt} = \frac{\partial g_1}{\partial K} \cdot \frac{dK}{dt} + \frac{\partial g_1}{\partial L} \cdot \frac{dL}{dt} = a \cdot ((-\mu_1 - \lambda\alpha_1)K - \lambda\beta_1L) + b \cdot ((-(1-\lambda)\alpha_1)K - ((1-\lambda)\beta_1 - \nu_1)L).$$

Допустим, справедливы неравенства

$$(-a\lambda - b(1-\lambda))\alpha_1 - a\mu_1 < 0, \quad (-a\lambda + b(1-\lambda))\beta_1 + b\nu_1 < 0. \quad (9)$$

Тогда  $\dot{g}_2 < 0$  на любом отрезке  $A_1B_1$ , лежащем в области 1 и параллельным отрезку  $AB$  (см. рисунок 1). Так как  $grad(g) = colon(a, b) > 0_2$ , то из условия  $\dot{g}_1 < 0$ , следует, что направляющий вектор  $colon(\dot{K}, \dot{L})$  касательной к траектории образуют с градиентом острый угол. Значит, фазовые траектории системы (1) пересекают отрезок  $A_2B_2$  под острым углом, то есть выходят из любого треугольника  $A_2OB_2$ . Итак, точка  $O(0;0)$  – устойчивое положение равновесия типа узел системы (1) в области 2. Найдём угловой коэффициент  $q$  особого луча этого положения равновесия. Аналогично уравнению (8) получим

$$-\lambda\beta_1q^2 + (-\mu_1 - \lambda\alpha_1 - \nu_1 + (1-\lambda)\beta_1)q + (1-\lambda)\alpha_1 = 0. \quad (10)$$

Предположим, что уравнения (8) и (10) имеют общий положительный корень. Тогда особый луч узла является продолжением исходящей сепаратрисы седла.

Рассмотрим треугольник  $AOB$  с вершинами  $O(0,0)$ ,  $A(c/a, 0)$ ,  $B(0, c/b)$  (см. рисунок 1). Очевидно, что на отрезке  $OA$  при  $0 < K \leq c/a$  имеем оценку  $\dot{L} = (1-\lambda)\alpha_2K > 0$ , а на  $OB$  при  $0 < L \leq c/b$  имеем  $\dot{K} = \lambda\beta_2L > 0$ . Значит, в области 2 выполняется условие положительной инвариантности (по крайней мере, на некотором отрезке времени). В частности, траектории системы (1) пересекают отрезки  $OA$  и  $OB$  внутрь области 2.

Из проведенных рассуждений следует, что траектории не могут пересекать отрезки  $AP$  и  $BP$ , то есть границы области 2 сами являются траекториями. Причем в силу свойств векторного поля при сделанных предположениях движение вдоль  $AP$  и  $BP$  происходит к  $P$ .

### Выводы

В результате проведенных рассуждений было доказано следующее утверждение.

**Теорема.** Если выполняются условия (6), (7), (9) и уравнения (8), (10) имеют один общий положительный корень, то система (1)–(4) имеет единственное устойчивое положение равновесия.

Из теоремы следует, что при любых начальных значениях производственных факторов из области 2 со временем экономика стабилизируется. То есть величины факторов приближаются к координатам точки  $P$  (см. рисунок 1). Соответственно, стабилизируется и валовой выпуск. Таким образом в области 1 ограниченная экономика в соответствии с моделью (1) расширяется только до своих естественных пределов. Для начальных значений факторов из области 1 требуется дополнительная оценка области устойчивости положения  $P$ , так как в силу модели 1 не исключается выход вдоль траекторий из области 1 в области, где факторы отрицательны.

**Пример.** Рассмотрим систему вида (1)–(4), в которой:  $\mu_1 = \mu_2 = 0.05$ ,  $\nu_1 = \nu_2 = 0.05$ ,  $g(K, L) = 10K + 7L - 1500 = 0$ ,  $\lambda = 0.5$ ,  $\alpha_1 = \beta_1 = 2$ ,  $\alpha_2 = \beta_2 = -1$ .

Нетрудно проверить, что условия вида (6), (7), (9) выполняются. Уравнения вида (8), (10) имеют один общий положительный корень  $p = 1$ . Значит, условия доказанной теоремы выполняются. Система вида (1) имеет устойчивое положение равновесия  $(88.2353, 88.2353)$ . Расположение траекторий и поля направлений построены в программе Maple и показаны на рисунке 2.

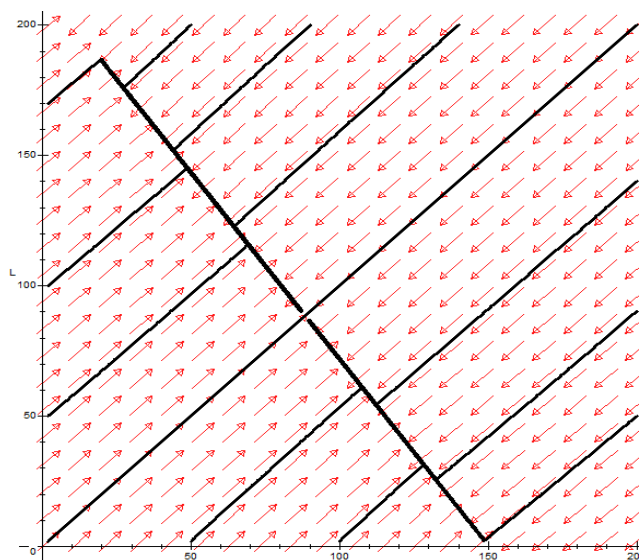


Рис. 1. Пример расположения траекторий и поля направлений системы (1)

### Библиографический список

1. Solow, R.M. A Contribution to the Theory of Economic Growth / R.M. Solow // The Quarterly Journal of Economics. – 1956. – Vol. 70, № 1. – P. 65–94.
2. Абрамов, В.В. Качественное исследование модели односекторной экономики / В.В. Абрамов // Известия РАЕН. Дифференциальные уравнения. – 2007. – № 12. – С. 11–15.
3. Абрамов, В.В. Стационарные состояния в модели односекторной экономики / В.В. Абрамов // Дифференциальные уравнения и математическое моделирование. – 2021. – Вып. 2. – С. 4–9.

УДК 544.354-128; ГРНТИ 47.03

## КОНТУР ПРОПУСКАНИЯ ЦИФРОВОЙ ИОННОЙ ЛОВУШКИ С АСИММЕТРИЧНОЙ ФОРМОЙ ИМПУЛЬСНОГО ПИТАНИЯ

А.И. Иванов, Н.В. Коненков

Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина,  
Российская Федерация, Рязань, sasha9182-2015@yandex.ru

*Аннотация.* В работе представлены результаты численного моделирования контура возбуждения цифровой ионной линейной ловушки с асимметричным импульсным питанием. Установлены зависимости параметра  $q_{eject}$  выброса ионов из ловушки от параметра асимметрии  $d$  на частотах резонансного синусоидального возбуждения колебаний ионов  $\beta\Omega/2$  для  $\beta=0.5$ . Частоты колебаний ионов различны по  $x$  и  $y$  координатам. Представлена форма периодических колебаний ионов при значении параметра  $q_{eject}$  ( $\beta=0.5$ ) для  $x$  и  $y$  поперечных координат ловушки. Получено, что при времени возбуждения  $n=500$  периодов импульсного питания разрешающая способность составляет  $R_{0,5}\approx 200$  и практически не зависит от возбуждения по  $x$  и  $y$  координатам.

*Ключевые слова:* цифровая ионная ловушка, асимметричная форма импульсного питания, контур возбуждения, разрешающая способность, уравнения движения ионов.

## TRANSMISSION CIRCUIT OF A DIGITAL ION TRAP WITH AN ASYMMETRICAL PULSE POWER SUPPLY FORM

A.I. Ivanov, N.V. Konenkov

Ryazan State University named for S.A. Yesenin,  
Russia, Ryazan, sasha9182-2015@yandex.ru

*The summary.* The paper presents the results of numerical simulation of the excitation circuit of a digital linear ion trap with asymmetric pulsed power supply. The dependences of the parameter  $q_{eject}$  of ion ejection from the trap on the asymmetry parameter  $d$  at the frequencies of resonant sinusoidal excitation of ion oscillations  $\beta\Omega/2$  for  $\beta=0.5$  have been established. The vibration frequencies of the ions are different along the  $x$  and  $y$  coordinates. The shape of periodic oscillations of ions is presented at the value of the parameter  $q_{eject}$  ( $\beta=0.5$ ) for the  $x$  and  $y$  transverse coordinates of the trap. It was found that with an excitation time of  $n=500$  periods of pulsed power supply, the resolution is  $R_{0,5}\approx 200$  and practically does not depend on the excitation along the  $x$  and  $y$  coordinates.

*Keywords:* digital ion trap, asymmetric pulsed power supply, excitation circuit, resolution, ion motion equations.

При синусоидальном питании линейной ионной ловушки при резонансном возбуждении дополнительным дипольным напряжением ионы одновременно удаляются на  $X$  и  $Y$  электроды ловушки, так как частоты колебаний ионов одинаковы по  $x$  и  $y$  координатам ( $a=0$ ). Вследствие этого теряется половина детектируемых ионов. В работе авторов [1] показано, что путем изменения скважности (duty cycle) импульсного питающего напряжения можно обеспечить резонансный выброс ионов из ловушки только по  $y$  координате без дополнительного дипольного сигнала. Такая возможность возникает из-за пересечения зон стабильности по  $x$  и  $y$  координатам [2, 3].

Цифровая ионная ловушка с несимметричной формой импульсного питания рассматривается в [4]. Асимметрия формы приводит к различию областей стабильности на плоскости  $a, q$  параметров по  $x$  и  $y$  координатам. В результате возможно возбуждение колебаний ионов по  $x$  или по  $y$  координатам без потери ионов. Показано, что максимальный акцептанс ловушки достигается при значении параметра  $\beta=0.5$ . Для этого случая рассчитана зависимость детектируемой массы  $m/z$  иона от параметра асимметрии  $d$ , которая имеет квадратичный характер.

Целью данной работы является исследование формы периодических траекторий ионов, установление зависимости параметра выброса  $q_{eject}$  от параметра асимметрии импульса  $d$ .

На основе полученных данных исследуется форма контура возбуждения (аналогичный форме массового пика).

### Форма импульса и уравнения движения ионов

В работе рассматривается асимметричная форма импульсного напряжения, показанная на рис. 1.

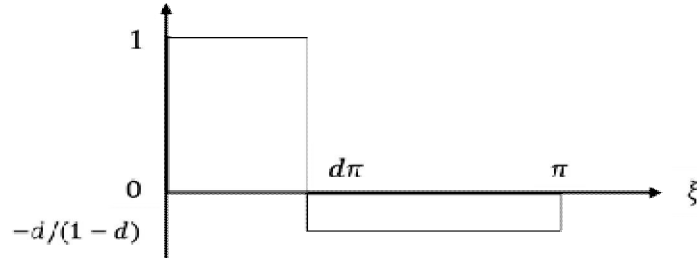


Рис. 1. Форма импульса в безразмерных единицах,  $d$  – параметр асимметрии

Форма импульса выбрана из соображений, чтобы среднее значение амплитуды импульса за период  $\pi$  было равно нулю, когда площади отрицательной и положительной частей импульса равны. Форма импульса описывается функцией [4]:

$$f(\xi) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \xi \leq \pi d \\ -\frac{d}{(1-d)}, & \pi d \leq \xi \leq \pi \end{cases}. \quad (1)$$

Уравнения движения ионов в квадрупольном поле описываются уравнением Хилла [5]:

$$\frac{d^2 x}{d\xi^2} + [a + 2qf(\xi - \xi_0)]x = 0, \quad (2)$$

$$\frac{d^2 y}{d\xi^2} - [a + 2qf(\xi - \xi_0)]y = 0, \quad (3)$$

где  $x$  и  $y$  поперечные координаты,  $a$  и  $q$  – безразмерные параметры

$$a = \frac{8zeU}{m\Omega^2 r_0^2}; \quad q = \frac{4zeV}{m\Omega^2 r_0^2} = \frac{8zedV_0}{m\Omega^2 r_0^2}. \quad (4)$$

В формуле (4)  $ze$  – заряд иона,  $e$  – заряд электрона,  $V_0$  – амплитуда положительной части импульса и  $-dV_0/(1-d)$  – амплитуда отрицательной части,  $\pm U$  – дополнительное постоянное напряжение, подаваемое на электроды линейной ловушки. В дальнейшем полагаем  $U=0$  ( $a=0$ ).

### Параметр стабильности $\beta$

Спектр частот колебаний ионов в области стабильности определяется параметром стабильности  $\beta$ :  $|2n+\beta|\Omega/2$ ,  $n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ,  $\Omega=2\pi/T$  – частота следования импульсов. Колебания ионов на основной (секулярной) частоте  $\beta\Omega/2$  имеют наибольшую амплитуду и поэтому на этой частоте осуществляют дипольное резонансное воздействие на ионах заданной массы. На рис. 2 приведены зависимости параметров  $\beta_x$  (рис.2а) и  $\beta_y$  (рис.2б) от параметра  $q$ . Из рис. 2 следует, что частоты колебаний ионов по  $x$  и  $y$  координатам различны при заданном  $q$ . Границе стабильности  $q_b$  по координатам  $x$  и  $y$  соответствует  $\beta=1$ .

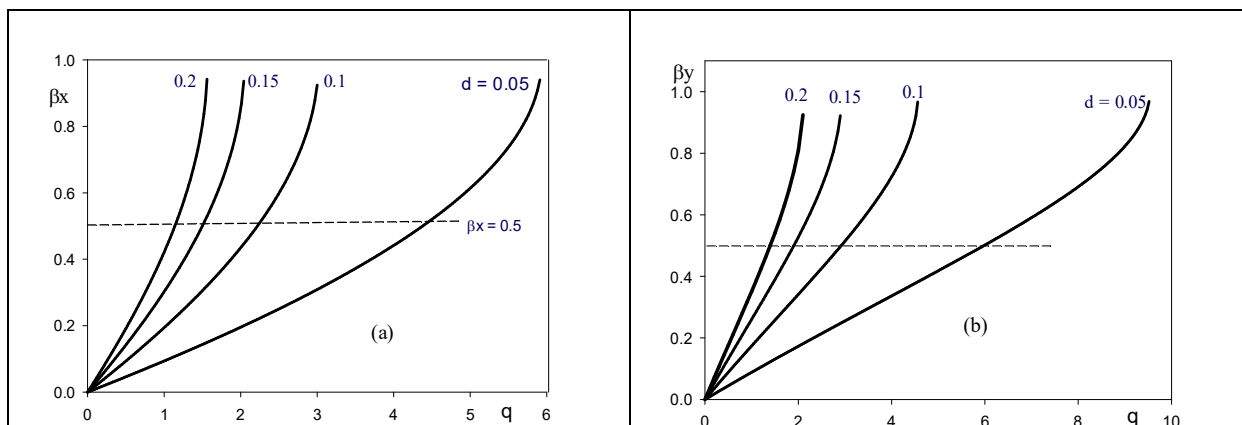


Рис. 2. Зависимости параметров  $\beta_x$  и  $\beta_y$  от параметра  $q$  для значений параметра асимметрии  $d=0.05, 0.1, 0.15$  и  $0.2$ . Точкам пересечения прямой  $\beta=0.5$  с кривыми  $\beta(q)$  соответствуют точки  $q_{eject}$  выброса ионов из ловушки

Сканирование по массам ионов возможно путем изменения амплитуды  $V_0$  при постоянном значении  $d$ . Это обычный режим работы линейной ловушки, когда диапазон масс ограничивается конечной величиной амплитуды  $dV_0(1-d)$ . Для цифровой ионной ловушки сканирование осуществляется путем изменения параметра  $d$  (формы импульса) при постоянном значении амплитуды  $V_0$  и постоянной частоте возбуждения  $\beta\Omega/2$ . Это иллюстрируется пунктиром для  $\beta=0.5$  на рис. 2. Величина  $\beta=0.5$  соответствует приблизительно максимуму акцептанса при всех значениях  $d$  [4]. В этом случае достигается большой диапазон масс вплоть до  $m/z = 100$  kDa, что важно для анализа больших биологических молекул [1-3]. Название «цифровая ионная ловушка» (DIT) связано с тем, что форма импульса формируется компьютером в процессе сканирования.

На рисунке 3 приведены значения параметров  $q_x$  и  $q_y$  выброса ионов из ловушки в зависимости от параметра  $d$  асимметрии импульса. Зависимости приведены в log-log масштабе с целью показать, что  $q \sim 1/d$ . Кривые пересекаются при  $d=0.5$ , когда частоты колебаний ионов одинаковы по  $x$  и  $y$  координатам. На рисунке 3 приведены аппроксимирующие функции этих зависимостей. В результате этого зависимость  $m/z(d)$  имеет квадратичный характер [4].

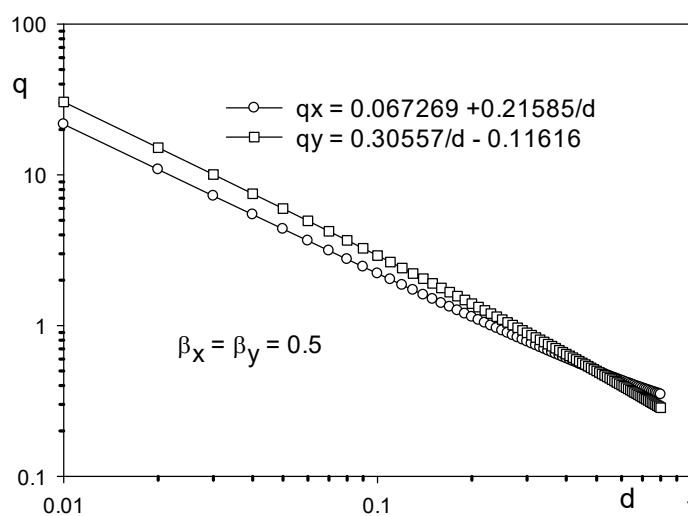


Рис. 3. Зависимости параметров выброса  $q_x$  и  $q_y$  от параметра асимметрии  $d$  при дипольном возбуждении на частоте  $\omega=\Omega/4$

## Траектории ионов

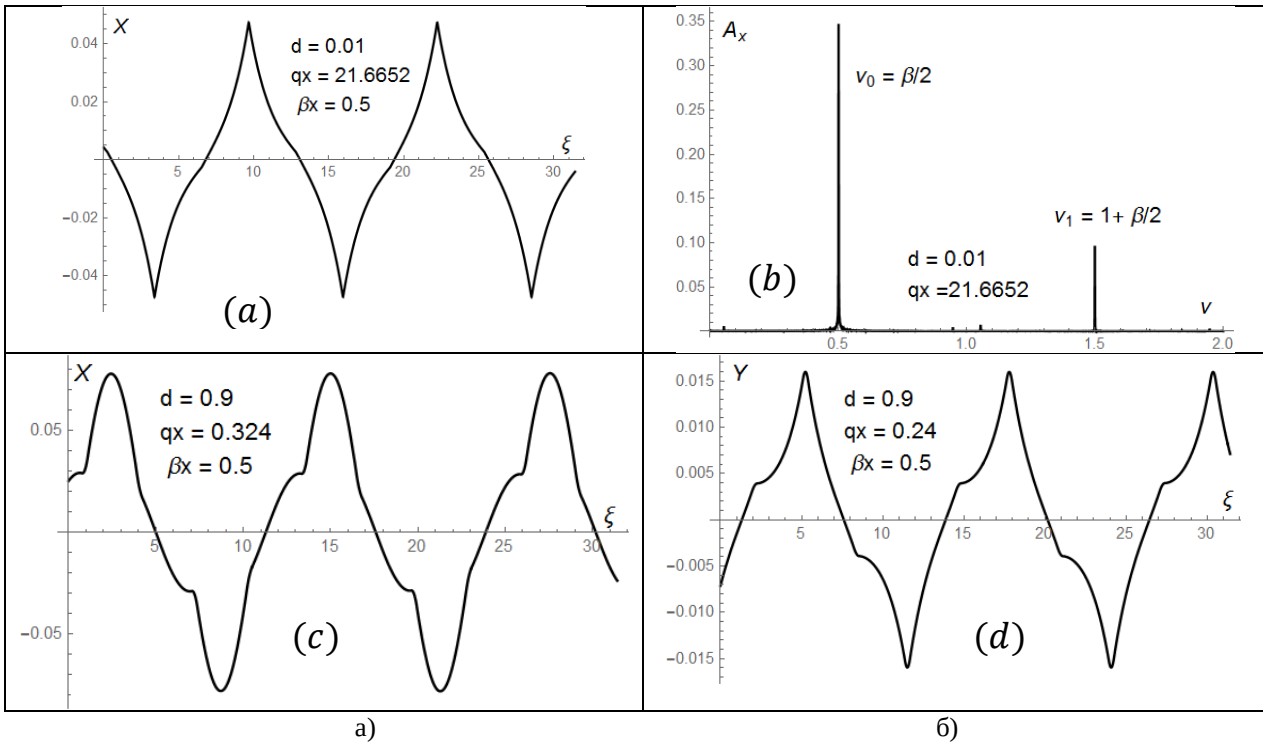


Рис. 4. Форма колебаний ионов по координатам при указанных параметрах выброса  $q_x$  и  $q_y$  и значениях параметра асимметрии  $d=0.01$  (a) и  $d=0.9$  (c,d) для параметра  $\beta_x=0.5$

Форма колебаний ионов в линейной ионной ловушке (ЛИТ) показана на рисунке 4a для параметра симметрии  $d = 0.01, 0.9$  и указанных значений параметра выброса  $q_x$ . Безразмерная секулярная частота колебаний ионов равна  $\nu=\beta_x/2$  и период колебаний  $T=\nu/2=4\pi$ . Период колебаний ионов, как следует из рисунка 4, соответствует  $\Delta\xi\cong 12.56$ . На рисунке 4б видно, что основная гармоника имеет наибольшую амплитуду колебаний ионов. Это подтверждается частотным спектром на рисунке 4б, где представлены две гармоники колебаний ионов с частотами  $\nu_0=\beta_x/2$  и  $\nu_1=1+\beta_x/2$ .

## Контур возбуждения

В первом приближении массовый пик – это контур возбуждения, модифицированный полем выходной щели и входным полем детектора. Для моделирования контура возбуждения используется траекторный метод [6]. Уравнения движения ионов при наличии дипольного резонансного возбуждения по координате  $x$  имеют вид:

$$\frac{d^2x}{d\xi^2} + [2qf(\xi - \xi_0)]x + 2q_{ex} \cos 2\nu\xi = 0, \quad (5)$$

$$\frac{d^2y}{d\xi^2} - [2qf(\xi - \xi_0)]y = 0, \quad (6)$$

где  $q = \frac{2eV_{ex}}{m\Omega^2 r_0^2} = \frac{1}{2} \frac{V_{ex}}{V} q$ ,  $V_{ex} \cos \omega t$  – дипольное напряжение, а  $\nu=\omega/\Omega=\beta/2$ . Интегрирование

уравнений движения на интервале  $(0, \pi)$  осуществляется в кодах “Mathematica-10”. Начальные координаты и скорости задавались нормальным случайным распределением со средним квадратичным отклонением  $\sigma_x=0.01r_0$  и  $\sigma_v=0.0072\pi r_{of}$  [6]. Начальная фаза  $\xi_0$  определялась случайным равномерным распределением на интервале  $(0, \pi)$ .

По данным рисунка 3 для  $\beta_x=0.5$  задавались величины параметров  $q_{ejec}$  и  $d$ . Определялся интервал изменения ( $q_{ejec}-\Delta q, \Delta q+q_{ejec}$ ) параметра  $q$ . Величина  $\Delta q$  подбирается опытным путем для достаточного представления формы контура возбуждения. Безразмерная амплитуда  $q_{ex}$  определялась так, чтобы интенсивность контура возбуждения составляла 100%, при этом достигается максимальная разрешающая способность [6]. На заданном интервале задавались 20 точек  $q_i$ , в которых рассчитывалось  $N=100$  траекторий при указанных случайных начальных условиях на интервале  $(0-\pi)$ . Величина  $n$  есть время возбуждения, выраженное в числе периодов импульсного напряжения. Число траекторий ионов при данном  $q_i$ , амплитуда которых превышает  $r_0$ , обозначим через  $N_{ex}$ . Тогда доля ионов, попавших на X электрод будет равна  $S=N_{ex}/N$ , будет определять контур возбуждения  $S(q)$ .

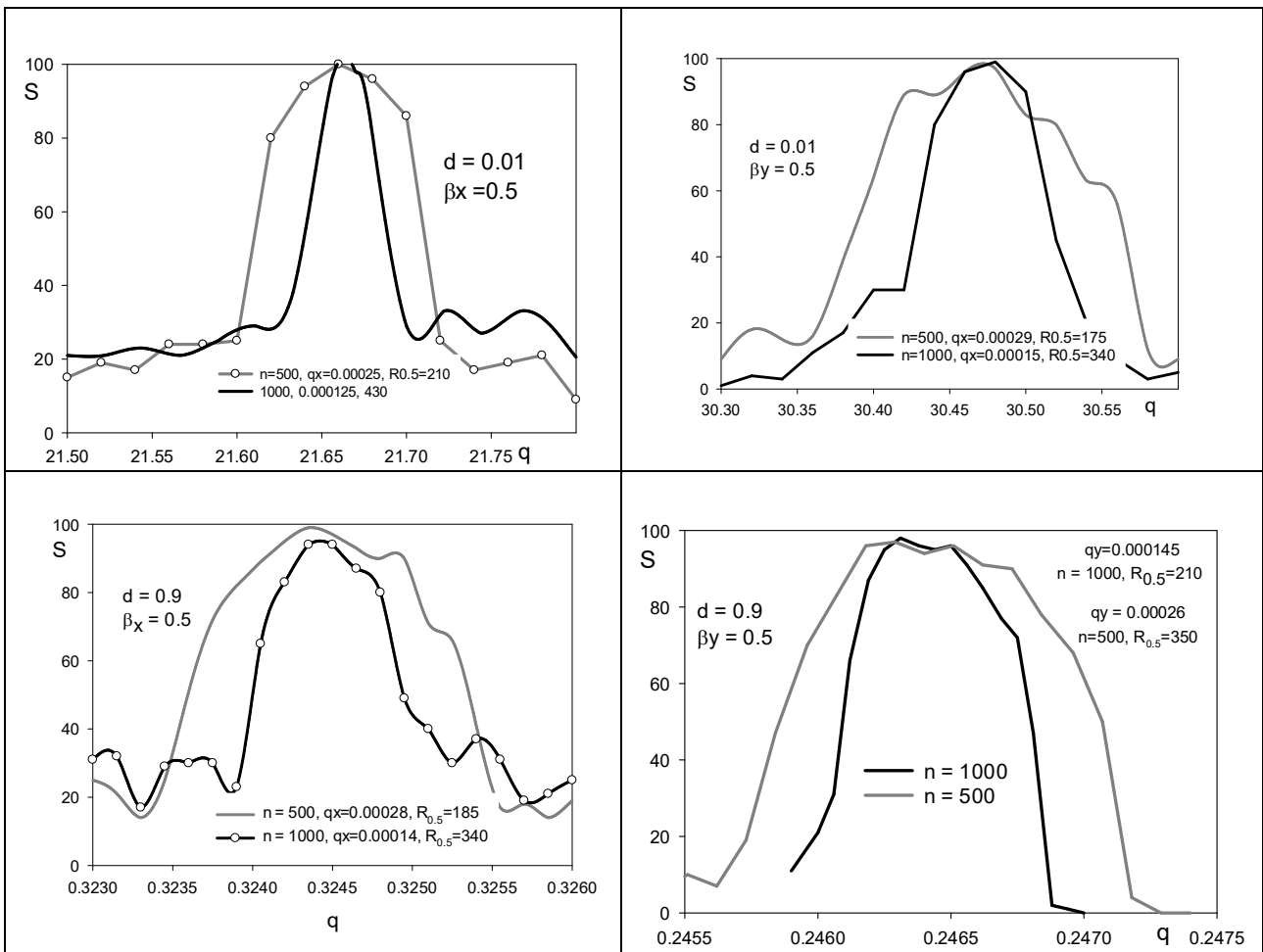


Рис. 5. Контурсы возбуждения для параметра асимметрии  $d=0.1$  и  $d=0.9$  на частоте  $\nu=0.25$

Для сравнения на рисунке 5 приведены контурсы возбуждения по x координате и y координате для  $\beta_x=\beta_y=0.5$ . При малых значениях параметра асимметрии  $d=0.01$  разрешающая способность  $R_{0.5}=430$ , определенная по 50% уровню контура, при времени возбуждения  $n=1000$  по x координате немного больше, чем по y координате. Для  $d=0.9$  по двум координатам при  $n=1000$  разрешение одинаково и составляет  $R_{0.5}=350$ . Увеличение времени  $n$  возбуждения в два раза приводит к увеличению разрешения также в два раза. Без учета буферного газа в линейной ловушке разрешающая способность равна  $R = Cq \frac{d\beta}{dq} n$ , где постоянная C

определяется выбором уровня высоты пика,  $q=q_{ejec}$  – параметр выброса,  $\frac{d\beta}{dq}$  – производная

зависимости  $\beta(q)$  (рис. 2),  $n$  – время возбуждения. Можно видеть, что разрешающая способность  $R$  пропорциональна параметру выброса  $q$ , величина которого почти на два порядка выше для малой величины  $d=0.01$  (рис.5a,b) чем для  $d=0.9$  (рис. 5c,d). Тем не менее разрешающая способность приближенно одинакова для двух значений  $d$ . Это объясняется тем, что при больших значениях  $q$  наклон кривой  $\beta(q)$  уменьшается (рис. 2). Уменьшение производной  $\frac{d\beta}{dq}$  компенсируется увеличением параметра  $q$ , в результате разрешающая способность существенно не изменяется при изменении параметра асимметрии  $d$ . Нужно заметить, что безразмерная амплитуда  $q_{ex}$  мало меняется при изменении  $d$ , при этом требуемое значение  $q_{ex}$  обратно пропорционально времени возбуждения  $n$ .

### Заключение

Показано, что ионная линейная ловушка с указанной формой импульса может работать в обычном режиме, когда фиксируется форма пика (параметр  $d$ ) и меняется амплитуда импульса. В цифровом режиме программируется изменение формы импульса, и при определённом значении  $d$  происходит выброс иона заданной массы из ловушки. В обоих случаях используется дополнительное дипольное напряжение с заданной частотой  $\nu=\beta/2$ .

Показано, что параметр выброса  $q_{ejec} \sim 1/d$ , что важно при линеаризации шкалы масс при изменении параметра  $d$ . Форма траекторий имеет вид треугольных импульсов и, следовательно, имеет широкий спектр колебаний ионов. Амплитуда второй гармоники колебаний сравнима с основной и может быть использована также для резонансного возбуждения.

Независимо от величины параметра асимметрии  $d=0.01-0.9$  достигается разрешающая способность  $R_{0.5} \approx 175-220$  при амплитуде дипольного напряжения  $q_{ex}=0.00025-0.00030$  и времени возбуждения  $n=500$  периодов импульсного питания.

### Библиографический список

1. Reece M.E., Huntley A.P., Moon A.M., Reilly P.T.A. Digital Mass Analysis in a Linear Ion Trap without Auxiliary Waveforms. - Journal of the American Society for Mass Spectrometry, 2020, v.31. - pp. 103–108.
2. Brabec G.F., Reilly P.T.A. Mapping ion stability in digitally driven ion traps and guides. - International Journal of Mass Spectrometry, 2014, v.364. - pp. 1–8.
3. Reilly P.T.A., Brabec G.F. Mapping the pseudopotential well for all values of the Mathieu parameter  $q$  in digital and sinusoidal ion traps. - International Journal of Mass Spectrometry, 2015, v.392. - pp. 86–90.
4. Ivanov A.I., Sysoev A.A., Konenkov A.N., Konenkov N.V. Modeling of a Linear Ion Trap with Driving Rectangular Waveforms. - Journal of Mass Spectrometry, 2024.
5. Konenkov N.V., Sudakov M.Y., Douglas D.J. Matrix Methods for the Calculation of Stability Diagrams in Quadrupole Mass Spectrometry. - Journal of the American Society for Mass Spectrometry, 2002, v.13. - pp. 597–613.
6. Douglas D.J., Konenkov N.V. Mass selectivity of dipolar resonant excitation in a linear quadrupole ion trap. - Rapid Communications in Mass Spectrometry, 2014, v.28. - pp. 430–439.



УДК 519.6; ГРНТИ 27.41.17

**О ПРИМЕНЕНИИ ФОРМУЛЫ НЬЮТОНА-КОТЕСА****Г.Е.Козлов***Ярославское Высшее Военное училище Противовоздушной Обороны,  
Российская Федерация, Ярославль, kge2064@gmail.com*

*Аннотация.* В работе рассматриваются две группы методов численного интегрирования, которые позволяют найти значения определенных интегралов с любой заданной точностью. Формулы Ньютона-Котеса характеризуются равноотстоящими друг от друга точками на оси абсцисс и включают в себя хорошо известные методы (прямоугольников, трапецеидальный и Симпсона). В свою очередь в гауссовской интерполяции наилучшая возможная точность обеспечивается разбиением промежутка на оси абсцисс и выбора соответствующих весов. В статье используется комбинация методов для приближенного вычисления несобственных интегралов особого вида: произведения трансцендентной функции и полинома степени  $n$ .

*Ключевые слова:* аппроксимация, формулы Ньютона-Котеса, квадратура Гаусса, методы численного интегрирования, интегрируемые сингулярности.

**ON THE APPLICATION OF THE NEWTON-COTES FORMULA****G.E.Kozlov***Yaroslavl Higher Military School of Air Defense,  
Yaroslavl, Russian Federation, kge2064@gmail.com*

*Annotation.* The paper considers two groups of numerical integration methods that allow us to find the values of certain integrals with any given accuracy. The Newton-Cotes formulas are characterized by equidistant points on the abscissa axis and include well-known methods (rectangles, trapezoidal and Simpson). In turn, in Gaussian interpolation, the best possible accuracy is provided by dividing the gap on the abscissa axis and choosing the appropriate weights. The article uses a combination of methods for approximate calculation of improper integrals of a special kind: the product of a transcendental function and a polynomial of degree  $n$ .

*Keywords:* approximation, Newton-Cotes formulas, Gauss quadrature, numerical integration methods, integrable singularities.

Методы численного интегрирования можно разделить на две группы: Ньютона-Котеса и формулы квадратуры Гаусса [1]. Формулы Ньютона-Котеса характеризуются равноотстоящими друг от друга точками на оси абсцисс и включают в себя хорошо известные методы, такие как формула трапеций и правило Симпсона. Они наиболее полезны, когда  $f(x)$  – гладкая функция и равные интервалы могут быть рассчитаны с небольшими затратами. Поскольку формулы Ньютона-Котеса основаны на локальной интерполяции, они требуют только кусочной аппроксимации полинома. В гауссовой квадратуре расположение абсцисс выбрано таким образом, чтобы обеспечить наилучшую возможную точность. Поскольку квадратура Гаусса требует меньшего количества итераций подинтегральной функции для данного уровня точности, она популярна в тех случаях, когда интеграл требует больших вычислений. Еще одним преимуществом квадратуры Гаусса является ее способность обрабатывать интегрируемые сингулярности.

Для приближенного вычисления интеграла  $\int_a^b f(x)dx$  на отрезке  $[a, b]$  по формуле трапеций используется формула

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{h}{2} [f(a) + 2f(x_1) + 2f(x_2) + \dots + 2f(x_{n-1}) + 2f(b)],$$

где  $h$  – шаг интегрирования, а  $x_i$  – точки на отрезке  $[a, b]$  с постоянным шагом  $h$ .

Эта формула приближенно оценивает площадь под кривой графика функции  $f(x)$  на заданном отрезке. Чем меньше шаг интегрирования, тем более точным получается результат.

Формулы Гаусса хорошо подходят для оценки интегралов вида ([1]):

$$\int_a^b \omega(x)f(x)dx, \quad (1)$$

где  $\omega(x)$  - весовая функция, которая может не являться гладкой на счетном множестве точек, т.е. содержать интегрируемые особенности. Например, такая ситуация подходит для интеграла  $\int_0^1 (1+x^2) \ln x dx$ .

Формулы гауссовского интегрирования в общем случае имеют тот же вид, что и формулы Ньютона-Котеса:

$$I = \sum_{i=0}^n A_i f(x_i), \quad (2)$$

где  $I$  - аппроксимация интеграла (1). Отличие в том, что веса  $A_i$  и узловые точки  $x_i$  определяются по другому. При интегрировании методом Ньютона-Котеса расположение точек  $x_i$  предопределено. В гауссовской квадратуре узлы и веса выбирают так, что уравнение (2) дает точный результат, если  $f(x)$  - многочлен степени  $2n+1$  или меньше:

$$\int_a^b \omega(x)P_m(x)dx = \sum_{i=0}^n A_i P_m(x_i), \quad m \leq 2n+1. \quad (3)$$

Один из способов определения весов и абсцисс- сделать замену в уравнении (3):

$$P_0(x) = 1, P_1(x) = x, \dots, P_{2n+1}(x) = x^{2n+1}$$

и решить полученные  $2n+2$  уравнения вида

$$\int_a^b \omega(x)x^j dx = \sum_{i=0}^n A_i x_i^j, \quad j = 0, 1, \dots, 2n+1.$$

В этой системе нелинейных уравнений неизвестными являются  $A_i$  и  $x_i$ .

Рассмотрим, как такой метод можно применить к вычислению несобственного интеграла  $\int_0^\infty e^{-x} f(x) dx$ .

Имеем:  $\omega(x) = e^{-x}$ ,  $a = 0$ ,  $b = \infty$ ,  $n = 1$ . Получаем нелинейную систему четырех уравнений с четырьмя неизвестными  $x_0$ ,  $x_1$ ,  $A_0$ , и  $A_1$ .

$$\begin{cases} \int_0^\infty e^{-x} dx = A_0 + A_1, \\ \int_0^1 e^{-x} x dx = A_0 x_0 + A_1 x_1, \\ \int_0^1 e^{-x} f(x) dx = A_0 x_0^2 + A_1 x_1^2, \\ \int_0^1 e^{-x} f(x) dx = A_0 x_0^3 + A_1 x_1^3. \end{cases}$$

Непосредственно находим

$$\int_0^{\infty} e^{-x} dx = -e^{-\infty} + e^0 = 1,$$

$$\int_0^{\infty} e^{-x} x dx = (-xe^{-x} - e^{-x}) \Big|_0^1 = 1,$$

$$\int_0^{\infty} e^{-x} x^2 dx = (-x^2 e^{-x} - 2xe^{-x} - 2e^{-x}) \Big|_0^1 = 2,$$

$$\int_0^{\infty} e^{-x} x^3 dx = (-x^3 e^{-x} - 3x^2 e^{-x} - 6xe^{-x} - 6e^{-x}) \Big|_0^1 = 6.$$

После вычисления интегралов получаем систему

$$\begin{cases} A_0 + A_1 = 1, \\ A_0 x_0 + A_1 x_1 = 1, \\ A_0 x_0^2 + A_1 x_1^2 = 2, \\ A_0 x_0^3 + A_1 x_1^3 = 6, \end{cases}$$

которая сводится к решению уравнения третьей степени. В результате имеем:

$$\begin{cases} x_0 = 2 - \sqrt{2}, \\ A_0 = \frac{1 + \sqrt{2}}{2\sqrt{2}}, \\ x_1 = 2 + \sqrt{2}, \\ A_1 = \frac{-1 + \sqrt{2}}{2\sqrt{2}}. \end{cases}$$

Тогда формула интегрирования принимает вид

$$\int_0^{\infty} e^{-x} f(x) dx \approx \frac{1}{2\sqrt{2}} \left( (\sqrt{2} + 1) f(2 - \sqrt{2}) + (\sqrt{2} - 1) f(2 + \sqrt{2}) \right).$$

Аналогично для интеграла  $\int_0^1 f(x) \ln x dx$ , где  $\omega(x) = \ln x$ ,  $a = 0$ ,  $b = 1$ ,  $n = 1$ , получим:

$$\begin{cases} A_0 + A_1 = -1, \\ A_0 x_0 + A_1 x_1 = -\frac{1}{2}, \\ A_0 x_0^2 + A_1 x_1^2 = -\frac{1}{6}, \\ A_0 x_0^3 + A_1 x_1^3 = -\frac{1}{12}. \end{cases}$$

И, соответственно

$$\begin{cases} x_0 = \frac{1}{\sqrt{6}}, \\ A_0 = -\frac{1}{2}\left(1 + \sqrt{\frac{3}{2}}\right), \\ x_1 = -\frac{1}{\sqrt{6}}, \\ A_1 = -\frac{1}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{3}{2}}\right). \end{cases}$$

$$\int_0^1 f(x) \ln(x) dx \approx -\frac{1}{2} \left( \left(1 + \sqrt{\frac{3}{2}}\right) f\left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right) + \left(1 - \sqrt{\frac{3}{2}}\right) f\left(-\frac{1}{\sqrt{6}}\right) \right).$$

Из-за нелинейности уравнений этот подход не работает при больших  $n$ . Более серьезные практические методы нахождения  $x_i$  и  $A_i$  требуют применения ортогональных полиномов и их связи с квадратурой Гаусса.

1. Глазырина Л.Л., Карчевский М.М. Численные методы: учебное пособие. — Казань: Казан. ун-т, 2012. — 122 с

УДК 510.644; ГРНТИ 27.03.33

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ СВЕТОФОРНЫМ ЦИКЛОМ «ТРАНСПОРТ – ПЕШЕХОДЫ» НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

**К.В. Зайкин, А.Н. Конюхов**

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, [chronos@bk.ru](mailto:chronos@bk.ru)*

*Аннотация.* В статье предложена модель управления циклом светофора «транспорт-пешеходы» на основе нечеткого вывода Мамдани. Цель моделирования – сократить среднее время ожидания пешеходов, существенно не влияя на дорожную ситуацию. Произведен ряд имитационных вычислительных экспериментов, в которых исследовано влияние некоторых параметров системы нечеткого вывода на показатели эффективности управления (среднесуточное и пиковое время ожидания пешехода, суточный трафик автотранспорта).

*Ключевые слова:* управление светофорным циклом, лингвистическая переменная, база нечетких правил, функция принадлежности, нечеткий вывод Мамдани.

## SIMULATION OF TRAFFIC LIGHT CYCLE CONTROL AT PEDESTRIAN CROSSING BASED ON FUZZY LOGIC

**K.V. Zaikin, A.N. Konyukhov**

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, [chronos@bk.ru](mailto:chronos@bk.ru)*

*The summary.* The paper discusses simulation for traffic light cycle control at pedestrian crossing based on Mamdani's fuzzy inference. The purpose of the simulation is to reduce the waiting time for pedestrians without significantly affecting the traffic situation. A number of simulation computational experiments were carried out, in which the influence of some parameters of the fuzzy inference system on control efficiency indicators (average daily and peak pedestrian waiting time, daily traffic) was investigated.

*Keywords:* traffic light cycle control, linguistic variable, fuzzy rule base, membership function, Mamdani fuzzy inference.

Проблема интеллектуального управления светофорным циклом (УСЦ) на основе нечеткой логики не является новой и достаточно глубоко изучена в ряде работ [1-3], причем уже имеется множество запатентованных технических решений.

Тем не менее, остается немало вопросов относительно влияния разнообразных параметров системы нечеткого вывода (СНВ) на эффективность управления светофорным циклом. Системное исследование этой проблемы не представлено в общедоступных источниках. Вместе с тем параметрическая настройка СНВ может стать резервом для повышения эффективности УСЦ. Отметим также, что большинство работ по рассматриваемой тематике выполнено с применением специализированных программ, включающих готовые модули для нечеткого моделирования (например, FuzzyLogicToolbox для MatLab или его аналог для SciLab), что весьма ограничивает возможности варьирования некоторых параметров СНВ, а также возможности имитационного моделирования различных ситуаций.

Предметная область данного исследования: светофорный цикл «транспорт-пешеходы». Цель исследования: проследить влияние ряда параметров СНВ типа Мамдани на показатели эффективности управления (среднесуточное и пиковое время ожидания пешехода, суточный трафик автомобилей).

Задачи, выполненные в ходе исследования: 1) оценено влияние на показатели эффективности структурных параметров модели УСЦ: количество и форма термов лингвистических переменных (ЛП); способы построения базы нечетких правил (БНП); правила агрегации антецедентов; 2) проведено имитационное моделирование модели управления за сутки без стохастической составляющей и при ее наличии; 3) выбраны наилучшие параметры представленной модели на основе сравнения с базой при неуправляемом светофорном цикле.

Модель реализована в системе компьютерной алгебры «MathCad» и включает следующие управляемые параметры: количество и форма термов для антецедентов и консеквента, построенных на основе нечетких чисел LR-типа; набор T-норм и T-конорм, включающий стандартные нормы Заде, а также нормы Ларсена и Лукасевича, можно использовать и любые другие; порядок регрессии (первый или второй), используемый для аппроксимации базы нечетких правил (БНП) по ее основным правилам; время разрешающего сигнала для пешеходов, пропускная способность пешеходного перехода, коэффициент случайности (при моделировании количества пешеходов) и некоторые другие. Процедурное оформление модели позволяет параметризовать и другие параметры, что важно для дальнейшего совершенствования модели.

Входные лингвистические переменные модели: ЛП1 - количество ожидающих у светофора людей, заданная на универсуме от 0 до N человек (далее N=100); ЛП2 – дорожная ситуация (ДС) до управляемого пешеходного перехода и ЛП3 – ДС после него (оценка ДС по десятибалльной шкале от 0 до 9 баллов). Выходная лингвистическая переменная – ЛП4 - длительность разрешающего сигнала для автомобилей, сек. Универсум для ЛП4 – от 0 до 120 сек. Каждая из четырех лингвистических переменных представлена несколькими термами, заданными уни- или полимодальными нечеткими числами (НЧ) LR-типа с функциями принадлежности (ФП)

$$\mu(x, ls, ml, mr, rs) = \begin{cases} L\left(\frac{ml-x}{ls}\right), & \text{если } ml - ls \leq x < ml \\ 1, & \text{если } ml \leq x \leq mr \\ R\left(\frac{x-mr}{rs}\right), & \text{если } mr < x \leq mr + rs \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases}, \quad (1)$$

где  $L(t)$ ,  $R(t)$  – левая и правая функции формы (в базовом случае, линейная  $1-t$ );

$ls$ ,  $rs$  – левый и правый спрэды НЧ;

$ml$ ,  $mr$  – левая и правая границы ядра НЧ.

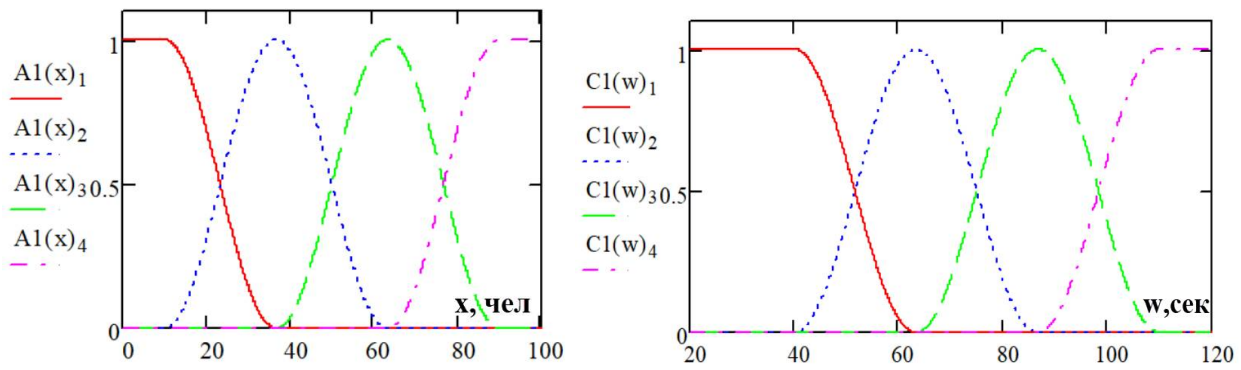


Рис. 1. Графики ФП термов входной ЛП1 «Количество ожидающих пешеходов» (слева) и выходной ЛП «Длительность разрешающего сигнала для транспорта» (справа). Функции формы – гармонические

Задана база нечетких правил (БНП) типа Мамдани с тремя antecedentes, связанными конъюнктивно при помощи любой T-нормы, имеющая вид:

$$\tilde{\mathcal{R}}_M(x, y, z, w) = \bigvee_{i=1}^n \tilde{A1}_i(x) \wedge \tilde{A2}_i(y) \wedge \tilde{A3}_i(z) \wedge \tilde{C1}_i(w), \tag{2}$$

где  $\tilde{A1}_i(x)$ ,  $\tilde{A2}_i(y)$ ,  $\tilde{A3}_i(z)$  - термы antecedентных ЛП1, ЛП2 и ЛП3 соответственно;  
 $\tilde{C1}_i(w)$  - термы консеквентной ЛП4.

Нечеткими логическими правилами для составления БНП являются словесные конструкции. Например, ЕСЛИ (ожидающих людей много) И (дорожная ситуация до светофора спокойная) И (дорожная ситуация после светофора спокойная), ТО (длительность разрешающего сигнала для транспорта меньше среднего) и т.д. В совокупности эти конструкции образуют базу нечетких правил следующего вида:

$R_i$ : ЕСЛИ  $A1$  есть  $A1_{k1}$  и  $A2$  есть  $A2_{k2}$  и  $A3$  есть  $A3_{k3}$  ТО  $C1$  есть  $C1_{k4}$ ,

где  $i$  - номер правила,  $k_m$  – номера термов соответствующих ЛП.

Поскольку количество правил может быть велико, описывать все их вручную может оказаться непростой задачей. Использовался следующий подход: формировалось только ядро БНП (рис. 2), содержащее базовые правила, остальные же аппроксимировались с помощью многофакторной регрессии.

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 4 & 4 & 4 & 4 & 1 & 1 & 2 & 4 \\ 1 & 1 & 4 & 4 & 1 & 1 & 4 & 4 & 1 & 2 & 1 & 2 \\ 1 & 4 & 1 & 4 & 1 & 4 & 1 & 4 & 2 & 1 & 1 & 2 \\ 4 & 1 & 4 & 1 & 1 & 1 & 4 & 1 & 2 & 4 & 1 & 2 \end{pmatrix}$$

Рис. 2. Основные правила матрицы БНП вывода Мамдани. Первые три строки – номера термов ЛП-антецедентов, последняя – номера термов ЛП-консеквента

В базовом варианте нечеткого вывода Мамдани применялась T-норма Заде (min) для получения одного составного antecedента:

$$\tilde{C1}'(w) = (\tilde{A1}' \wedge \tilde{A2}' \wedge \tilde{A3}') \circ_T \tilde{\mathcal{R}}(x, y, z, w) = \bigvee_{\substack{x \in X, y \in Y, \\ z \in Z, w \in W}} (\tilde{A1}' \wedge \tilde{A2}' \wedge \tilde{A3}') \wedge \tilde{\mathcal{R}}(x, y, z, w) \tag{3}$$

В качестве T-конормы для агрегации консеквентов использовалась T-конорма Заде (max).

В вариантах сравнения использовались:

– T-норма и T-конорма Ларсена

$$\Delta_1(x, y) = x \cdot y, \quad \nabla_2(x, y) = x + y - x \cdot y; \quad (4)$$

– Т-норма и Т-конорма Лукасевича

$$\Delta_1(x, y) = \min(1, x + y), \quad \Delta_2(x, y) = \max(0, x + y - 1). \quad (5)$$

В результате вывода (3) получается выходное нечеткое множество (рис. 3).

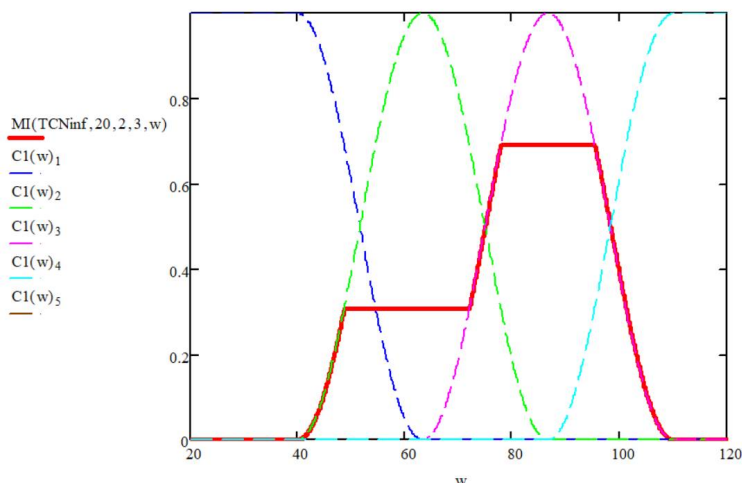


Рис. 3. Выходное нечеткое множество в системе нечеткого вывода Мамдани

Дефаззификацию  $\widetilde{C1}(w)$  выполняли центроидным методом, используя быстрый алгоритм, предложенный в работе [4].

В результате на выходе получаем четкое значение длительности разрешающего сигнала для транспорта. Чтобы визуализировать результат, необходимо зафиксировать значение одного из трех antecedентов (рис. 4).

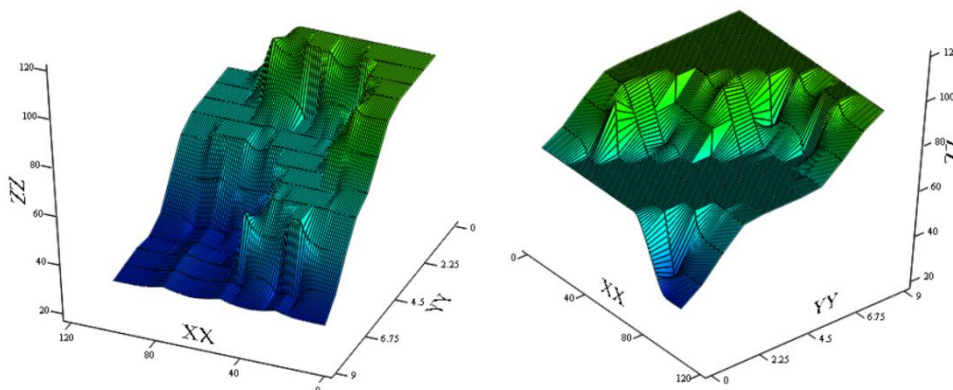


Рис. 4. График зависимости периода включения Z, сек., разрешающего сигнала пешеходного светофора от X - количества ожидающих людей; Y - дорожной ситуации, баллов, до светофора (слева) и после светофора (справа)

Для оценки эффективности управления светофорным циклом использовались следующие показатели: пиковое среднее время ожидания пешеходов на переходе (сек.); среднее время ожидания за различные периоды времени суток, полученное интегральным усреднением (сек.), интегральная пропускная способность для автотранспорта за сутки (ед.).

Варьируемые параметры: количество термов antecedентов и консеквента, тип функций формы, порядок регрессионной аппроксимации БНП, виды Т-норм и Т-конорм.

Исследование влияния параметров производилось относительно базового набора параметров (количества термов antecedентов и консеквента равного трём; Т-нормы и Т-конормы Заде; первый порядок регрессии для аппроксимации БНП).

### Выводы

1. Оптимальное количество термов - четыре, так как в условиях значительной стохастической компоненты потока пешеходов модель с тремя термами становится нестабильной; при увеличении количества термов больше четырех возрастает вычислительная нагрузка без значимого роста эффекта.

2. Сравнение влияния Т-норм агрегации antecedентов на результат показало, что значительно эффективнее использовать Т-нормы Лукасевича по сравнению с нормами Заде и Ларсена, в том числе, в условиях значительной доли стохастической компоненты в потоках.

3. Синусоидальная функция формы обеспечивает более высокую гладкость управления.

4. При увеличении порядка регрессии, аппроксимирующей БНП, значительного эффекта не наблюдается, поэтому следует использовать самую простую модель (порядок регрессии 1).

### Библиографический список

1. Куценко Л. Е. Повышение эффективности организации движения в городе на основе минимизации заторов: дис... канд. техн. наук. Орел, 2016. - 124 с.
2. Бобырь М.В., Храпова Н.И., Ламонов М.А. Система управления интеллектуальным светофором на основе нечеткой логики. Известия Юго-Западного государственного университета. 2021; 25(4): С. 162-174.
3. Тарасов О.В., Корнилов С.Н. Оптимизация режимов работы объектов светофорного регулирования методами нечеткой логики // Современные проблемы транспортного комплекса России. с. 139-143.
4. Бухенский К.В., Конюхов А.Н., Дюбуа А.Б., Сафошкин А.С. Быстрый алгоритм расчета индексов нечеткости для унимодальных нечетких чисел LR-типа // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2019. №70. С. 65-75.

УДК 519.21; ГРНТИ 27.43.15

## КОСВЕННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛЯ СГЛАЖИВАНИЯ МНОГОМЕРНОГО СЛУЧАЙНОГО СИГНАЛА

К.А. Ципоркова, Г.С. Лукьянова

*Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Россия, Рязань, ktsiporkova@list.ru*

*Аннотация.* Метод построения сглаженной оценки в виде ортогонального разложения измерения распространяется на случай косвенных измерений. Получены расчетные соотношения для нахождения оценки многомерного полезного сигнала. Рассмотрены имеющие практическую ценность примеры.

*Ключевые слова:* векторный случайный процесс, косвенные измерения, математическое ожидание, ковариационная матрица, ортогональное разложение, сглаженная оценка, критерий качества.



## INDIRECT MEASUREMENTS FOR SMOOTHING A MULTIDIMENSIONAL SIGNAL

K.A. Tsiporkova, G.S. Lukyanova  
Ryazan State Radiotechnical University,  
Russia, Ryazan, ktsiporkova@list.ru

*Abstract.* The method for constructing a smoothed estimate in the form of an orthogonal decomposition of a measurement is extended to the case of indirect measurements. Calculation relations for finding an estimate of a multidimensional useful signal are obtained. Examples of practical value are considered.

*Keywords:* vector random process, indirect measurements, mathematical expectation, covariance matrix, orthogonal decomposition, smoothed evaluation, quality criterion.

1. Векторный (многомерный) случайный процесс  $\bar{\xi}(t) = (\xi_1(t); \xi_2(t); \dots; \xi_n(t))^T$  с нулевым математическим ожиданием и ковариационной матрицей

$$R_{\xi} = M[\bar{\xi}(t) \cdot \bar{\xi}^T(t)] = [R_{\xi_i \xi_j}(t_1; t_2)]_{i,j=1}^n = [R_{ij}]$$

измеряется с помехой  $\bar{v}(t) = (v_1(t); v_2(t); \dots; v_m(t))^T$ :

$$\bar{\eta}(t) = H \cdot \bar{\xi}(t) + \bar{v}(t), \quad 0 \leq t \leq T,$$

где  $\bar{\eta}(t) = (\eta_1(t); \eta_2(t); \dots; \eta_m(t))^T$  - вектор измерений;  $H = [h_{li}]_{i=1, n}^{l=1, m}$  - матрица, определяющая структуру измерений. Помеха имеет нулевое математическое ожидание и ковариационную матрицу

$$N_v = [N_{lp}] = [N_{v_l v_p}(t_1; t_2)]_{l,p=1}^m.$$

Оценка  $\hat{\xi}(t) = (\hat{\xi}_1(t); \hat{\xi}_2(t); \dots; \hat{\xi}_n(t))^T$  строится в виде линейной комбинации разложения сигналов  $\eta_l(t)$  по ортонормированной на  $[0; T]$  системе функций

$$\left\{ \varphi_k(t) : \int_0^T \varphi_k(t) \cdot \varphi_s(t) dt = \delta_{ks} \right\}$$

( $\delta_{ks}$  - символ Кронекера):

$$\hat{\xi}_i(t) = \sum_k \sum_{l=1}^m a_{il}^{(k)} \cdot \gamma_{lk} \cdot \varphi_k(t); \quad \gamma_{lk} = \int_0^T \eta_l(t) \cdot \varphi_k(t) dt. \quad (1)$$

Определению подлежат коэффициенты  $a_{il}^{(k)}$ .

2. Критерий качества вектора оценки  $\hat{\xi}(t) = (\hat{\xi}_1(t); \hat{\xi}_2(t); \dots; \hat{\xi}_n(t))^T$  запишем в виде:

$$J = \int_0^T M \left[ \left( \hat{\xi}(t) - \bar{\xi}(t) \right)^T \cdot B \cdot \left( \hat{\xi}(t) - \bar{\xi}(t) \right) \right] dt \rightarrow \min_{a_{il}^{(k)}}. \quad (2)$$

Здесь  $B = [b_{ij}]_{i,j=1}^n$  - симметрическая положительно определенная матрица, структура которой обусловлена характером решаемой задачи.

Введя обозначения

$$A_k = \left[ a_{il}^{(k)} \right]_{i=1, \overline{n}}^{j=1, \overline{m}}; \quad \Gamma_k = (\gamma_{1k}; \gamma_{2k}; \dots; \gamma_{mk})^T$$

Представим критерий качества в матричной форме

$$J = \int_0^T M \left[ \left( \sum_k A_k \cdot \Gamma_k \cdot \varphi_k(t) - \bar{\xi}(t) \right)^T B \left( \sum_r A_r \cdot \Gamma_r \cdot \varphi_r(t) - \bar{\xi}(t) \right) \right] dt. \quad (2')$$

Минимум (2') найдем, продифференцировав  $J$  по  $a_{ij}$ . В результате получим систему уравнений

$$\sum_{l=1}^m \sum_{s=1}^k \left( \sum_{p=1}^n \sum_{q=1}^n h_{jp} \cdot h_{lq} \cdot b_{is} \cdot G_k(R_{pq} + N_{jl}) \cdot a_{sl} \right) = \sum_{l=1}^m \sum_{s=1}^n b_{is} \cdot h_{jl} \cdot G_k(R_{ls});$$

$$i = \overline{1, n}; \quad j = \overline{1, m}.$$

Здесь  $G_k(R(t_1; t_2)) = \int_0^T \int_0^T R(t_1; t_2) \cdot \varphi_k(t_1) \cdot \varphi_k(t_2) dt_1 dt_2$ . Далее в целях наглядности результатов рассмотрим частные случаи, позволяющие сделать качественные выводы.

4. В простейшей ситуации при  $n = 2, m = 1$

$$A_k = (a_{1k}; a_{2k})^T; \quad H = (h_1; h_2).$$

Формулы оценки принимают вид:

$$\hat{\xi}_1(t) = \sum_k a_{1k} \cdot \gamma_k \cdot \varphi_k(t); \quad \hat{\xi}_2(t) = \sum_k a_{2k} \cdot \gamma_k \cdot \varphi_k(t),$$

где  $\gamma_k = \int_0^T \eta(t) \cdot \varphi_k(t) dt$ ;  $\eta(t) = h_1 \cdot \xi_1(t) + h_2 \cdot \xi_2(t) + v(t)$ .

Пусть, как это часто бывает в практических задачах, интерес представляет лишь первая компонента вектора полезного сигнала. Тогда

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad J = \int_0^T M \left[ \left( \sum_k a_{1k} \cdot \gamma_k \cdot \varphi_k(t) - \xi_1(t) \right)^2 \right] dt \rightarrow \min_{a_{1k}} \quad (2'')$$

Таким образом, в данной постановке задача сводится к минимизации функции одной переменной. Её решение дается формулой

$$a_{1k}^* = \frac{G_k(h_1 \cdot R_{11} + h_2 \cdot R_{12})}{G_k(h_1^2 \cdot R_{11} + 2h_1 \cdot h_2 \cdot R_{12} + h_2^2 \cdot R_{22} + N)}; \quad N = M[v(t_1) \cdot v(t_2)]. \quad (3)$$

Полагая  $B = \text{diag}(1; 1)$ , получаем для  $a_{1k}^*$  то же самое решение (3), а для  $a_{2k}^*$  формулу, аналогичную (3)

$$a_{2k}^* = \frac{G_k(h_1 \cdot R_{12} + h_2 \cdot R_{22})}{G_k(h_1^2 \cdot R_{11} + 2 \cdot h_1 \cdot h_2 \cdot R_{12} + h_2^2 \cdot R_{22} + N)}.$$

4. Сохранив постановку предыдущего раздела, будем строить оценку, следуя [1]:

$$\xi = \sum_{k \in K} \gamma_k \cdot \varphi_k(t); \quad J = \int_0^T M \left[ \left( \sum_{k \in K} \gamma_k \cdot \varphi_k(t) - \xi_1(t) \right)^2 \right] dt \rightarrow \min_k.$$

Т.е. минимизация критерия качества достигается за счет выбора структуры ортогонального разложения.

Преобразовав выражение для критерия качества (2''), получим

$$J_{\min} = \int_0^T R_{\xi_1 \xi_1}(t; t) dt - \sum_{k \in K} \Gamma_k,$$

где

$$K = \left\{ k : \Gamma_k = 2 \cdot h_1 \cdot G_k(R_{11}) + 2 \cdot h_2 \cdot G_k(R_{12}) - h_1^2 \cdot G_k(R_{11}) - 2 \cdot h_1 \cdot h_2 \cdot G_k(R_{12}) - h_2^2 \cdot G_k(R_{22}) - N > 0 \right\}.$$

В рамках рассматриваемой в настоящем разделе задачи можно ставить вопрос о нахождении наилучших значений параметров измерительного канала  $h_1, h_2$ . Ответ на этот вопрос может быть получен лишь совместно с определением оптимальной структуры разложения. В случае, когда актуальным является лишь конечное число вариантов построения  $K$ , задача может быть решена простым перебором (см., в частности, следующий раздел).

5. В качестве примера рассмотрим задачу выделения квазидетерминированного [2] квадратичного сигнала  $\xi_1(t) = \alpha \cdot t^2$  по измерению его смеси с производной  $\xi_2(t) = \xi_1'(t)$ . Здесь  $\alpha$  - центрированная случайная величина с дисперсией  $A$ . Помеха  $v(t)$  - центрированный белый шум интенсивности  $N$ . Таким образом,

$$R_{\xi_1}(t_1; t_2) = A \cdot t_1^2 \cdot t_2^2; \quad R_{\xi_1 \xi_2}(t_1; t_2) = 2 \cdot A \cdot t_1^2 \cdot t_2; \quad R_{\xi_2}(t_1; t_2) = 4 \cdot A \cdot t_1 \cdot t_2; \\ R_v(t_1; t_2) = N \cdot \delta(t_2 - t_1).$$

Без потери общности положим  $h_1 = 1$ . Таким образом,

$$\eta(t) = \xi_1(t) + h_2 \cdot \xi_2(t) + v(t).$$

В качестве базисной ортонормированной системы используем модифицированные многочлены Лежандра [3]:

$$P_0(t) = \frac{1}{\sqrt{T}}; \quad P_1(t) = \frac{2 \cdot \sqrt{3}}{T \cdot \sqrt{T}} \cdot \left( t - \frac{T}{2} \right); \quad P_2(t) = \frac{2 \cdot \sqrt{5}}{T^2 \cdot \sqrt{T}} \cdot \left( 3 \cdot t^2 - 3 \cdot T \cdot t + \frac{T^2}{2} \right);$$

Тогда соотношение (3) примет вид:

$$a_{1k}^* = \frac{\rho_{11}^{(k)} + h_2 \cdot \rho_{12}^{(k)}}{\rho_{11}^{(k)} + 2 \cdot h_2 \cdot \rho_{12}^{(k)} + h_2^2 \cdot \rho_{22}^{(k)} + N}; \quad \rho_{ij}^{(k)} = G_k(R_{ij}).$$

Окончательно

$$a_{10}^* = \frac{T^2 + 3 \cdot h_2 \cdot T}{T^2 + 6 \cdot h_2 \cdot T + 9 \cdot h_2^2 + 9 \cdot N \cdot A^{-1} \cdot T^{-3}}; \\ a_{11}^* = \frac{T^2 + 2 \cdot h_2 \cdot T}{T^2 + 4 \cdot h_2 \cdot T + 4 \cdot h_2^2 + 12 \cdot N \cdot A^{-1} \cdot T^{-3}};$$

$$a_{12}^* = \frac{1}{1+180 \cdot N \cdot A^{-1} \cdot T^{-5}};$$

$$a_{1k}^* = 0, \quad k \geq 3.$$

Решение задачи выбора оптимальной структуры разложения сводится к проверке условий:

$$\Gamma_0 = \frac{A \cdot T^5}{9} - h_2^2 \cdot A \cdot T^3 - N > 0;$$

$$\Gamma_1 = \frac{A \cdot T^5}{12} - h_2^2 \cdot \frac{A \cdot T^3}{3} - N > 0;$$

$$\Gamma_2 = \frac{A \cdot T^5}{180} - N > 0.$$

При этом  $\Gamma_k = -N < 0$  при  $k \geq 3$ . И, таким образом, возможны лишь 8 вариантов структуры оценки (включая «нулевой», когда  $\hat{\xi}_1(t) = 0$ ).

5. Распространив постановку пункта 3 на случай произвольного  $n$  при  $m=1$ , получим выражение для измерения в виде:

$$\eta(t) = h_1 \cdot \xi_1(t) + h_2 \cdot \xi_2(t) + \dots + h_n \cdot \xi_n(t) + \nu(t).$$

Если при этом  $B = \text{diag}(b_1, b_2, \dots, b_n)$ , то, действуя методами, аналогичными методам пункта 3, получим формулы оптимальных оценок

$$\hat{\xi}_i(t) = \sum_k a_{ik}^* \cdot \gamma_k \cdot \varphi_k(t);$$

$$a_{ik}^* = \frac{G_k \left( \sum_{l=1}^n h_l \cdot R_{il} \right)}{G_k \left( \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^n h_j \cdot h_l \cdot R_{jl} + N \right)}.$$

Если оптимизируется структура ортогонального разложения, то

$$\hat{\xi}_i(t) = \sum_{k \in K_i} \gamma_k \cdot \varphi_k(t);$$

$$K_i = \left\{ k : \Gamma_{ki} = 2 \cdot G_k \left( \sum_{l=1}^n h_l \cdot R_{il} \right) - G_k \left( \sum_{s=1}^n \sum_{l=1}^n h_s \cdot h_l \cdot R_{sl} + N \right) > 0 \right\}.$$

Если оценка первой компоненты строится на основе  $m$ -мерного измерения, то

$$\hat{\xi}_1(t) = \sum_k \sum_{l=1}^m a_{lk}^* \cdot \gamma_{lk} \cdot \varphi_k(t);$$

где  $a_{lk}^*$  - решение системы уравнений

$$\sum_{j=1}^m G_k \left( \sum_{s=1}^n \sum_{p=1}^n h_{sp} \cdot h_{jp} \cdot R_{sp} + N_{lj} \right) \cdot a_{jk} = G_k \left( \sum_{s=1}^n h_{ls} \cdot R_{s1} \right), \quad l = \overline{1, m}.$$

В случае оптимизации структуры

$$K = \left\{ k : 2 \cdot G_k \left( \sum_{s=1}^n \sum_{j=1}^m h_{js} \cdot R_{s1} \right) - G_k \left( \sum_{l=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{s=1}^n \sum_{p=1}^n h_{js} \cdot h_{lp} \cdot R_{sp} + N_{jl} \right) > 0 \right\}.$$

7. Результаты, полученные в настоящей работе, являются развитием и продолжением подходов и методов, предложенных в [4], [5], [6]. Постановка задачи близка к [7]. Однако её решение базируется на иной модели полезного сигнала. Приведенный пример оценивания квадратичного полезного сигнала по его взвешенной сумме с производной демонстрирует возможности предлагаемого подхода в условиях имеющей практическую ценность модели.

### Библиографический список

1. Дубовиков А.В. Выделение полезного сигнала из аддитивной смеси с помехой разложением измерения в ряд Фурье//Математические методы оптимального управления и обработки данных: Межвуз. Сб. Рязань, РГРТА, 1983. С. 32-36.
2. Челпанов И.Б. Оптимальная обработка сигналов в навигационных системах. М., Наука, 1967.
3. Суэтин П.К. Классические ортогональные многочлены. М., Наука, 1979.
4. Дубовиков А.В. Задача комплексирования измерительных данных при аппроксимации случайного сигнала ортогональным разложением// Математические методы в научных исследованиях: Межвуз. Сб. Рязань, 2002. С. 6-10.
5. Дубовиков А.В. О свойствах оптимального ортогонального разложения//Математические методы в научных исследованиях: Межвуз. Сб. Рязань, 2004. С. 15-18.
6. Дубовиков А.В., Дубовиков Д.А., Ципоркова К.А. Метод ортогональных разложений при совместной обработке сигналов разнородных измерителей случайного сигнала// Математические методы в экономических исследованиях: Межвуз. Сб. Рязань, 2006. С. 3-7.
7. Брайсон А., Хо Ю-Ши. Прикладная теория оптимального управления. М., Мир, 1972.

УДК 543.51; ГРНТИ 29.35.39

## ФОКУСИРОВКА ИОНОВ В БУФЕРНОМ ГАЗЕ В КВАДРУПОЛЬНОМ ФИЛЬТРЕ МАСС С ИМПУЛЬСНОЙ И СИНУСОИДАЛЬНОЙ ФОРМАМИ ПИТАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ

П.В. Бугров

Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина  
Российская Федерация, Рязань, p.bugrov@365.rsu.edu.ru

*Аннотация.* В работе рассматривается движение ионов в квадрупольном электрическом поле в присутствии буферного газа азота при разных формах питающих напряжений. Приводится уравнение движения ионов в квадрупольном поле с учетом столкновений ион-молекула. На основе математического моделирования выполнено сравнение зависимостей диаметра ионного пучка от давления для импульсного и синусоидального типов питающих напряжений.

*Ключевые слова:* моделирование, столкновения ион-молекула, квадрупольный фильтр масс, фокусировка ионов, ионно-оптические устройства

## FOCUSING OF IONS IN A BUFFER GAS IN A QUADRUPOLE MASS FILTER WITH PULSED AND SINUSOIDAL FORMS OF SUPPLY VOLTAGES

P.V. Bugrov

Ryazan State University named for S.A. Yesenin  
Russian Federation, Ryazan, p.bugrov@365.rsu.edu.ru

*The summer.* The paper considers the movement of ions in a quadrupole electric field in the presence of a nitrogen buffer gas at different forms of supply voltages. The equation of ion motion in a quadrupole field is given, taking into account ion-molecule collisions. Based on mathematical modeling, the dependences of the ion beam diameter on pressure for pulsed and sinusoidal types of supply voltages are compared.

*Keywords:* modeling, ion-molecule collisions, quadrupole mass filter, ion focusing, ion-optical devices

В работе исследуется влияние формы ВЧ напряжений на фокусировку ионов в азоте в квадрупольном электрическом поле. Использование буферного газа молекул малых масс в поле квадрупольного поля позволяет осуществить фокусировку ионов с относительно большими массами на вход квадрупольного анализатора и тем самым резко увеличить его пропускание и, следовательно, чувствительность анализа [1]. Для исследования фокусировки пучка ионов в буферном газе использовался метод численного интегрирования уравнения движения ионов в вязкой среде.

Уравнение движения ионов ВЧ квадрупольном электрическом поле имеет вид [2]:

$$\ddot{u} + \frac{2e}{mr_0^2}(U + V \cos \omega t)u = 0, \quad (1)$$

где  $u = \frac{x}{r_0}$  или  $u = \frac{y}{r_0}$  – безразмерные поперечные координаты фильтра масс;

$r_0$  – радиус вписанной окружности между вершинами электродов;

$e$  и  $m$  – заряд и масса иона;

$V$  – амплитуда ВЧ напряжения;

$t$  – время.

Для учета взаимодействия ион-молекула использовались модель твердых сфер и поляризационная модель, предложенные И.В. Курнином и М.И. Явором [3, 4, 5]. В модели твердых сфер предполагается, что газокинетическое сечение  $\sigma_s$  не зависит от относительной скорости иона и молекулы. В поляризационной модели считается, что буферный разряженный газ – это квазинепрерывная вязкая среда, где учитывается зависимость поляризационного сечения  $\sigma_p$  от относительной скорости между ионом и молекулой.

Уравнение движения ионов (1) при наличии вязкого трения имеет вид

$$\ddot{u} + 2q \cos(2\xi)u - \left( \frac{\bar{\lambda}}{\frac{g_u}{\pi f} + \frac{\bar{\lambda}}{\tau}} \cdot \frac{1}{\pi f} \right)^{-1} \frac{\dot{u}}{\pi f} = 0, \quad (2)$$

где  $q = \frac{4eV}{m\Omega^2 r_0^2}$  – безразмерный параметр уравнения Матье [2];

$\xi = \frac{\Omega t}{2}$  – безразмерное время;

$\dot{u}$  – скорость иона;

$\bar{\lambda}$  – средняя длина свободного пробега иона;

$\tau$  – среднее время между столкновениями;

$\Omega = 2\pi f$ .

Последний член в уравнении (2) описывает силу вязкого трения движения ионов в буферном газе.

Моделировалось движение ионов резерпина ( $m/z=609$  Da) в буферном газе молекул азота при давлениях 0.1 – 10 Па. Параметры квадрупольного поля: длина 32 см, частота  $f = 1$  МГц, амплитуда  $V = 200$  В, начальная аксиальная энергия ионов 20 эВ. Случайное распределение ионов на входной апертуре фокусирующего квадрупольного поля описывалось нормальным распределением поперечных скоростей и координат с дисперсией

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{2R_t T_g}{M_i}} (\pi f r_0)^{-1} \text{ и } \sigma_V = 0.2r_0, \text{ соответственно,}$$

где  $R_t$  – универсальная газовая постоянная;

$T_g$  – температура газа;

$M_i$  – масса иона.

На рисунке 1 приведены зависимости диаметра пучка на выходе фокусирующего квадрупольного фильтра от давления буферного газа для импульсного и синусоидального питания квадрупольного фильтра масс. Можно видеть, что с увеличением давления газа диаметр фокусного пятна на длине квадрупольного фильтра 32 см уменьшается и становится равным при давлении  $\cong 5.5$  Па для двух форм питающих напряжений. Однако при давлении буферного газа 10 Па явно проявляется преимущество импульсного питания (рис. 2), когда диаметр фокусного пятна в 60 раз меньше, чем для случая  $\sin$  напряжения и составляет  $0.0007 r_0$ .

Таким образом, представленные результаты моделирования в рамках модели соударения упругих шаров показывают существенное преимущество импульсного питания фокусирующего квадрупольного фильтра при давлении буферного газа 10 Па.

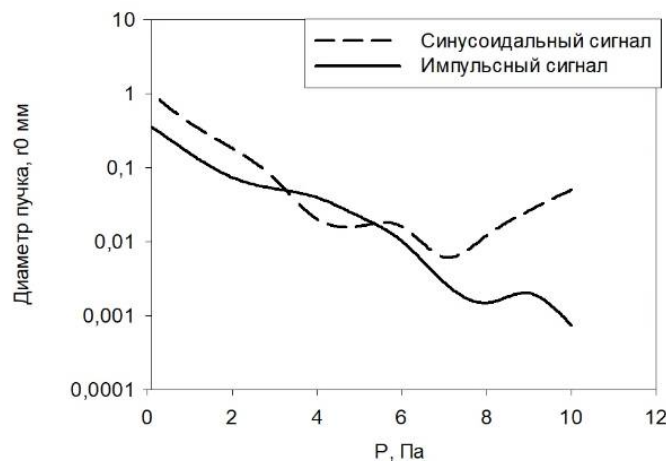


Рис. 1. Зависимость диаметра фокусного пятна от давления буферного газа для импульсного и синусоидального питания фокусирующего квадрупольного фильтра масс

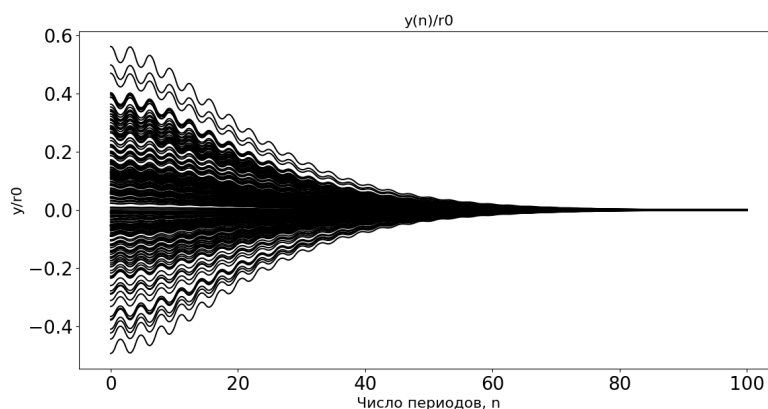


Рис. 2. Траектории ионов при импульсном питании и давлении буферного газа 10 Па

### Библиографический список

1. D.J. Douglas, J.B. French Collisional Focusing Effects in Radio Frequency Quadrupoles // Journal of the American Society for Mass Spectrometry. - 1992. - №3(4). - С. 398-408.
2. Dawson P.H. Quadrupole Mass Spectrometry and its Applications. - Amsterdam: Elsevier, 1976
3. Курнин И.В., Явор М.И. Особенности транспортировки ионных пучков в газонаполненных радиочастотных квадрупольных на промежуточных значениях давления // Журнал технической физики. - 2009. - №79(9). - С. 112-119.
4. Darius G., Ban G., Bregeault J., Delahaye P., Desrues P., Durand D., ... Vandamme C. Linear radio frequency quadrupole for the colling and bunching of radioactive ion beams // Review of Scientific. - 2004. - №75(11). - С. 4804-4810.
5. Кирюшин Д.В. Исследование динамики движения заряженных частиц в квадрупольных ВЧ полях в присутствии нейтрального газа: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.27.02. - Рязань, 2008. - 19 с.



## СЕКЦИЯ «ОБРАБОТКА ДАННЫХ, ИЗОБРАЖЕНИЙ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»

УДК 523.68+519.25, ГРНТИ 41.51.21

### МОДЕЛИ ЕСТЕСТВЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКОЛОЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА КАК ОСНОВА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ЕГО СОСТОЯНИЯ

В.С. Жабин, А.К. Муртазов

Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина  
v.zhabin@365.rsu.edu.ru, a.murtazov@365.rsu.edu.ru

*Аннотация.* Представлен обзор современных моделей метеорного вещества в околоземном пространстве. Эти модели могут быть положены в основу информационных систем, описывающих состояние ближнего космоса.

*Ключевые слова:* метеорное вещество, модели, метеорная астрономия.

#### Введение

Загрязнение ближнего космоса объектами естественного происхождения представляет собой потенциальную опасность для космической техники, состояния верхней атмосферы Земли. В основе информационной системы, учитывающей параметры этого загрязнения, лежат модели метеороидного вещества в околоземном пространстве. Метеороиды размерами менее 1 см не регистрируются существующими методами (исключение составляют прямые методы, основанные на подсчете следов соударений с метеороидами на поверхностях космических аппаратов). В связи с этим возможны только оптические и радиолокационные наблюдения метеорных явлений, которые создаются ими во время пролета в атмосфере.

В данной работе проанализированы существующие модели метеорного вещества и результаты определения потоков метеороидов методами оптической метеорной астрономии.

#### Метеорное вещество в окрестностях Земли

Нами были проанализированы применяющиеся в настоящее время модели естественного загрязнения околоземного пространства с целью оценки степени опасности воздействия метеорного вещества на космическую технику в ближнем космосе, а в конечном счете, на биосферу, жизнь и здоровье людей. Эти модели описывают ансамбли спорадического вещества, через которое проходит Земля в процессе своего орбитального движения, а также метеороиды метеорных потоков, пересекающих ее орбиту [13].

На рисунке 1 показана зависимость плотности потока метеороидов в Солнечной системе, проходящих через ОКП от их массы [2].

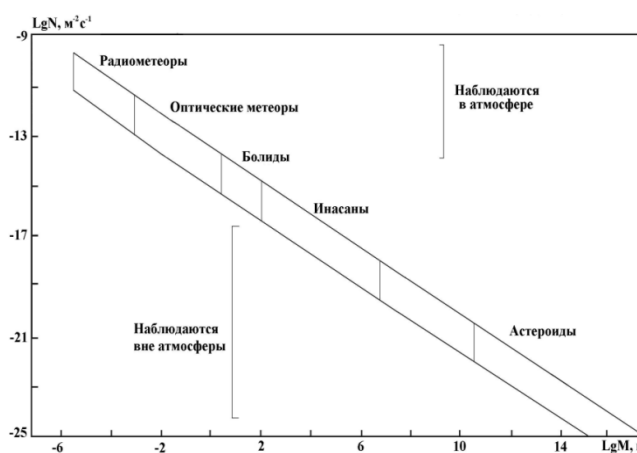


Рис. 1. Зависимость потока тел естественного происхождения в ОКП от их массы [2].

Раданты спорадических метеоров, образованных потоком межпланетной космической пыли, через которую пролетает Земля в своем орбитальном движении, имеют неравномерное распределение на небесной сфере [19, 20]. Выделяются шесть главных областей направлений спорадических метеоров (рис. 2).

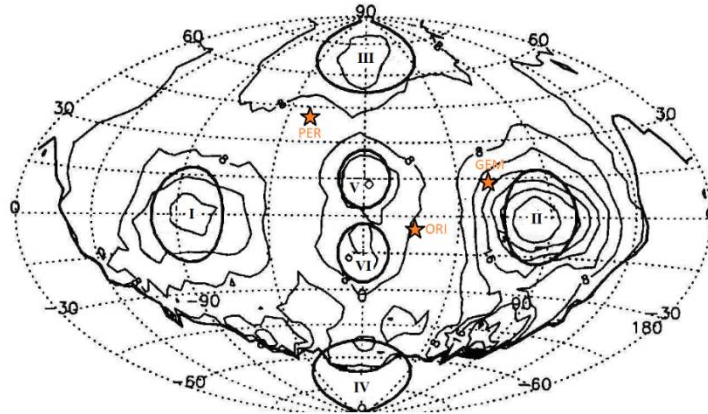


Рис. 2. Схема расположения основных направлений прихода спорадических метеоров на небесной сфере: I - направление на Солнце; II – противосолнечное направление; III – северная тороидальная составляющая; IV – южная тороидальная составляющая; V – северная составляющая апекса орбитального движения Земли; VI – его южная составляющая

Сезонная активность спорадических метеоров определяется как [25]

$$N(H, \lambda_{\odot}) = N_{spo}(H) - \Delta N_{spo}(H) \cos \lambda_{\odot}, \quad (1)$$

где  $N_{spo}$  – среднесуточное часовое число метеоров вблизи летнего солнцестояния;

$\Delta N$  – его годичная амплитуда;

$\lambda$  – эклиптическая долгота Солнца на данный момент времени. Это число может достигать 100 и более метеоров в сутки в зависимости от направления прихода метеороидов [8, 21].

В северном полушарии число спорадических метеоров имеет пик вблизи осеннего равноденствия и минимально вблизи весеннего равноденствия.

Период сезонной вариации спорадических метеоров составляет один тропический год.

В своем орбитальном движении Земля ежегодно пересекает более 100 метеорных потоков, содержащих как пылевую составляющую (менее 0,1 см) так и метеороиды (0,1 см – 100 м). На данный момент наблюдается более 20 мощных метеорных потоков, часовые числа которых лежат в интервале 20-140 метеоров в час. Кроме самых активных метеорных потоков наблюдается так же более 6000 малых или ассоциаций.

В таблице 1 приведены данные о наиболее активных метеорных потоках, и времени пересечения ими орбиты Земли.

Данные о содержании метеороидов в потоках являются усредненными. Содержание тел с размером менее миллиметра, определяется с помощью эмпирического коэффициента популяции, который рассчитывается исходя из предположений равномерного распределения частиц в потоке. В реальности неравномерность в распределении метеороидов в потоках увеличивается с массой и размером частиц.

Параметрами, определяющими воздействие потока метеорного вещества на околоземное пространство и Землю в целом являются его ширина, скорость метеороидов относительно планеты и количество крупных частиц в потоке.

Таблица 1. Основные метеорные потоки в районе земной орбиты

Поток	Период активности	Визуальное часовое число в максимуме	Скорость $v/v_h$ км/с	Плотность потока, $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$	Пространственная плотность, $\text{км}^{-3}$
Квадрантиды	1-4.01	50	41/38	$24 \cdot 10^{-12}$	$44 \cdot 10^{-9}$
Лириды	19-24.04	5	48/41	$6 \cdot 10^{-12}$	$8 \cdot 10^{-9}$
$\eta$ -Аквариды	1-8.05	20	66/39	$8 \cdot 10^{-12}$	$7 \cdot 10^{-9}$
Персеиды	15.07-25.08	60	60/42	$8 \cdot 10^{-12}$	$15 \cdot 10^{-9}$
Тауриды	15.09-1.12	(5)	30		$28 \cdot 10^{-9}$
Дракониды 1933 1946	8-10.10	$5 \cdot 10^3$ $3 \cdot 10^4$	50		$1,8 \cdot 10^{-4}$ $3,6 \cdot 10^{-4}$
Ориониды	18-26.10	20	66/42	$14 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-9}$
Леониды 1866	14-20.11	(5)	72/41	$2 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-9}$ $8 \cdot 10^{-7}$
Геминиды	7-15.12	(5)	36/34	$13 \cdot 10^{-12}$	$132 \cdot 10^{-9}$
Спорадические метеоры			11,2-72		$1,1 \cdot 10^{-6}$ - $1,2 \cdot 10^{-5}$

Число крупных метеороидов в потоках, представляющих опасность для космической техники, изменяется год от года. На рисунке 3 приведены данные по изменению содержания ярких метеороидов в метеорных потоках, полученные на *Cloudbait Observatory, Colorado, USA*.

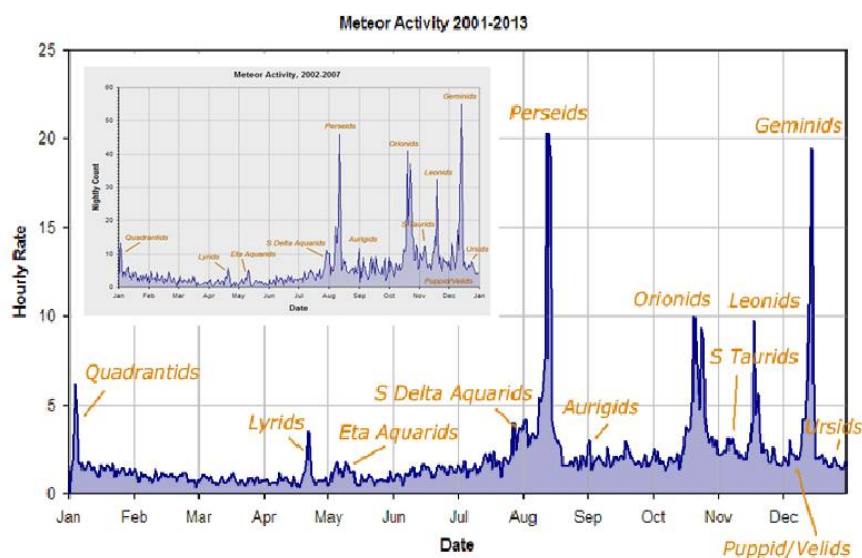


Рис. 3. Изменение числа ярких метеоров в 2001-2013 гг. (на врезке – в 2002-2007 гг.) по данным Cloudbait Observatory, Colorado [10, 24]

Подробное распределение ярких (опасных) метеороидов в потоке Персеиды в 2007-2022 гг. представлено на рисунке 4 [17, 23].

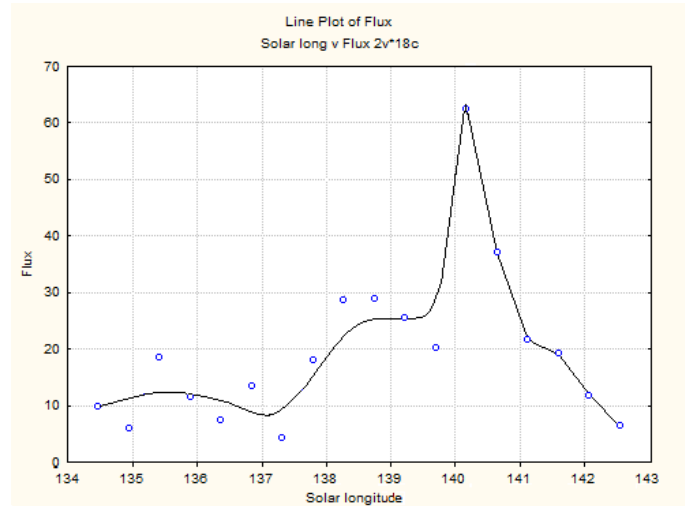


Рис. 4. Поток ярких Персеид в 2007-2022 гг. по результатам широкоугольных ПЗС-наблюдений

Эти данные показывают, что в среднем поток опасных метеороидов в Персеидах в период максимума потока (12-13 августа) составляет  $F=(3,8\pm 1.1)\cdot 10^{-7}$  км<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>, при том что на них приходится 0,076 от всех метеороидов в потоке. Среднее число соударений опасных (более 1 мм) метеороидов в пике потока  $R=0,4\cdot 10^{-6}$  м<sup>-2</sup> с вероятностью до 40%. В принципе, такой риск, хотя он и является небольшим, требует учета при построении информационных моделей околоземной среды.

Поскольку метеорное вещество в районе земной орбиты на расстоянии 1 а.е. от Солнца разделяется на спорадическое (его поток мало зависит от времени года) и принадлежащее метеорным потокам, модели метеорного вещества (описывающие состояние околоземного пространства) должны включать в себя моделирование и потоковой и спорадической составляющей. Обычно, модели состоят из трех частей, описывающих, соответственно, распределение частиц по массе, времени и продолжительности воздействия, распределение метеороидов по скоростям, и оценки плотности метеорного вещества в околоземном пространстве с учетом экранирования

Наиболее удобной характеристикой метеорной среды является величина потока метеорных частиц с массой  $m_i \geq m_0$  на единицу площади в единицу времени. По причине того, что распределение спорадических метеоров демонстрирует не только пространственные неоднородности, но и изменения плотности в зависимости от времени суток и сезона, в расчетах применяется осреднение результатов, полученных за длительные периоды времени и в различных районах наблюдений [10, 12].

На рисунке 5 представлены данные по потоку метеороидов астероидного, кометного и межзвездного происхождения [15] в сравнении с моделью [18] и данными по эрозии лунного реголита и экспериментов по пассивному сейсмическому зондированию Луны [5]. Он демонстрирует, что к орбите в 1 а.е. межзвездная пыль, имеющая массу  $>10^{-8}$  г, практически не проникает. В околоземном пространстве большая часть пыли имеет кометное происхождение.

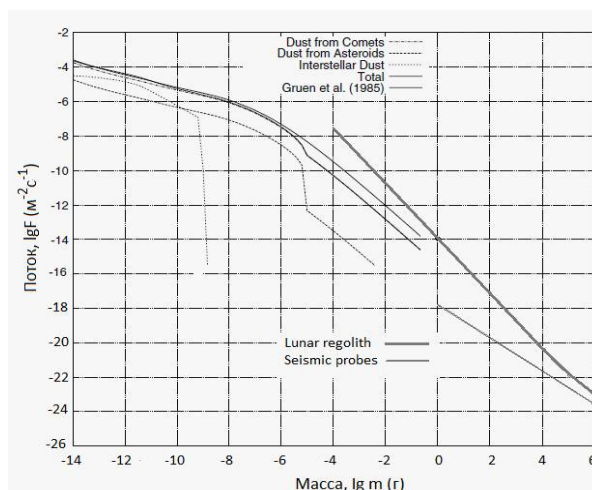


Рис. 5. Модель распределения «масса-поток» пыли различного происхождения вблизи 1 а.е. [15] – сверху и общий поток микрометеороидов вблизи лунной поверхности [5] – внизу

Исследования лунной поверхности позволяют оценить интенсивность потока метеороидов, при предположении, что общий поток вблизи Земли и Луны одинаков [5].

Модельные расчеты значений плотности потоков демонстрируют достаточно большие отклонения от полученных данным способом данных.

### Модели метеорного вещества в Солнечной системе

К настоящему времени разработан целый ряд моделей метеорного вещества в околоземном пространстве: модели Grün-93 и Divine-Staubach для межпланетной среды и околоземного пространства (1993, 1994); ГОСТ 25645.128-85 «Вещество метеорное; модель пространственного распределения» (1985); ряд моделей MASTER (1995), включающих модели Divine-Staubach, Cour-Palais и Jeniskens/McBride (1994); ORDEM (Kessler et al., 1996), MEM (NASA Meteoroid Environment Model, Cour-Palais, 1970) с большим количеством дополнений, IMEM (Dikarev, 2003) и др.

После 2000 г. на основе вышеуказанных моделей для использования в конкретных исследованиях было создано большое количество обновлений.

Одна из первых моделей метеорной среды в околоземном пространстве по данным визуальных наблюдений – модель Уиппла [4]:

$$\lg N = -14,48 + 2,68 \lg \left( \frac{0,44}{\rho} \right) - 1,34 \lg m \lg , \quad (2)$$

где  $N$  - поток метеорных частиц,  $\text{с}^{-1} \text{ м}^{-2}$ ;  $\rho$  - плотность частицы,  $\text{г/см}^3$ ;  $m$  - масса частицы, г. Средняя плотность метеорных частиц -  $0,44 \text{ г/см}^3$ , скорость относительно Земли принята равной  $30 \text{ км/с}$ .

По наблюдениям метеоров фотографическими методами разработана модель [14]. Данная модель, наряду с факторами, связанными с самим потоком, учитывает и факторы экранирования потока, гравитационного действия Земли (NASA SP-8013, 1969):

$$\lg N = -14,41 - \lg m - 4 \lg \left( \frac{V_{st}}{20} \right) + \lg F , \quad (3)$$

где  $v_{st}$  - геоцентрическая скорость потока,  $\text{км}\cdot\text{с}^{-1}$  (средняя скорость принята равной  $20 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$ );  $F$  – фактор активности - отношение потока метеоров в потоке к потоку спорадических частиц, определяющийся формой максимума потока и его продолжительностью.

Модель, представленная ниже, учитывает кометное и астероидное происхождение метеороидов.

С учетом неравномерности распределения радиантов потоков на небесной сфере уточненная модель выглядит для кометных метеороидов как (NASA SP-8038, 1970):

$$\lg S = -18,173 - 1,213 \lg m - 1,5 \lg R - 0,869 |\sin b|, \quad (4)$$

для  $10^{-6} \leq m \leq 10^2$ ;

$$\lg S = -18,142 - 1,584 \lg m - 0,063 (\lg m)^2 - 1,5 \lg R - 0,869 |\sin b|, \quad (5)$$

для  $10^{-12} \leq m \leq 10^{-6}$ .

Здесь  $S$  – пространственная плотность частиц, массой, большей  $m$ ,  $\text{м}^{-3}$ ;  $b$  – эклиптическая широта;  $R$  – гелиоцентрическое расстояние, а.е. Для метеороидов кометного происхождения плотность принята равной  $0,5 \text{ г}/\text{см}^3$ .

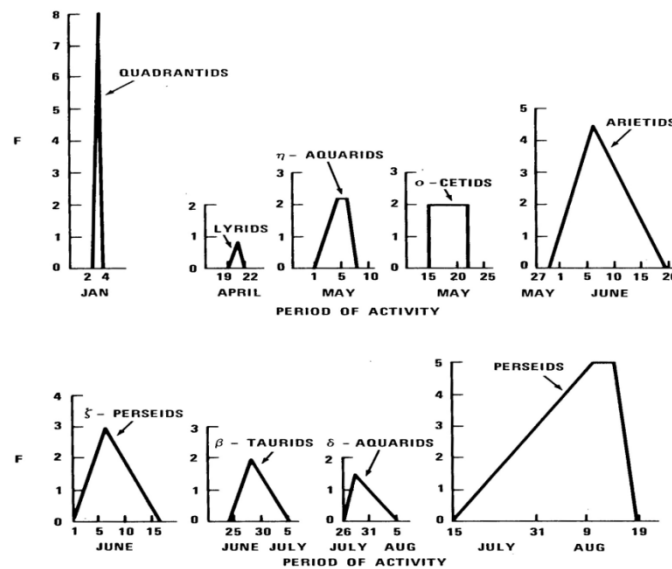


Рис. 6. Фактор активности (профили) основных метеорных потоков по модели MEM-1969

Пространственная плотность потоков для метеороидов астероидного происхождения:

$$\lg S = -15,79 - 0,84 \lg m + f(R) + g(G) \cos \lambda + h(b), \quad (6)$$

для  $10^{-9} \leq m \leq 10^2$ ;

$$\lg S = -8,23 + f(R) + g(G) \cos \lambda + h(b), \quad (7)$$

для  $10^{-12} \leq m \leq 10^{-9}$ ,

где  $\lambda$  – эклиптическая долгота;  $f(R)$  – коэффициент, нормирующий поток к расстоянию 2,5 а.е.;  $h(b)$  – коэффициент, нормирующий поток к плоскости эклиптики;  $g(R)$  – коэффициент, учитывающий асимметрию пояса астероидов по эклиптической долготе.

В России используется ГОСТ 25645.128 - 85 «Вещество метеорное. Модель пространственного распределения» [1], действующий с 1987 г. Этот стандарт основан на данных радиолокационных и визуальных наблюдений метеоров.

В нем нет разделения спорадических частиц на кометные и астероидные.

$$\lg N = -13,4 - 0,8 \lg m [m^{-2} c^{-1} (4\pi \text{степ})^{-1}] \quad (8)$$

для  $10^{-6} < m \leq 10^2$  г на удалении от поверхности Земли до  $10^6$  км;

$$\lg N = -13,4 - 1,2 \lg m \quad (9)$$

- для  $10^{-9} \leq m \leq 10^{-6}$  г на удалении от 200 км до 1000 км.

Плотность потока спорадических метеорных тел в геоцентрической и гелиоцентрической системе координат  $N(m, v, \varepsilon, \psi)$  определяется как:

$$N = N(m) * P_\varepsilon(v) * P(\varepsilon, \psi), \quad (10)$$

где  $N(m)$  – усредненная за год плотность потока спорадических метеорных тел массой, большей  $m$ ,  $m^{-2} c^{-1}$ ;  $P_\varepsilon(v)$  – условное распределение скоростей спорадических метеорных тел при фиксированном значении  $\varepsilon$ ,  $c \cdot \text{км}^{-1}$ ;  $P(\varepsilon, \psi)$  – двумерное распределение плотности радиантов спорадических потоков,  $\text{град}^{-2}$  (плотность вероятности появления метеорных тел в направлении  $\varepsilon$ ,  $\psi$  во всем интервале скоростей и масс);  $v$  – скорость спорадического метеорного тела,  $\text{км} \cdot \text{с}^{-1}$ .

В геоцентрической системе координат  $v = v_\infty$  – внеатмосферная скорость метеорного тела.

В гелиоцентрической системе координат  $v = v_h$  – гелиоцентрическая скорость метеорного тела;  $\varepsilon$  – угол между вектором скорости спорадического метеорного тела  $v$  и вектором, противоположном вектору орбитальной скорости Земли  $v_3$  (град);  $\psi$  – измеряется от плоскости эклиптики в направлении от Солнца к северному полюсу эклиптики,  $-180 \leq \psi \leq +180$ .

Средняя за год плотность потока спорадических метеороидных тел в ОКП  $N(m)$  массой больше  $m$  вычисляется как:

$$N(m) = N(m_0) * \left( \frac{m}{m_0} \right)^{1-S}, \quad (11)$$

где  $N(m_0)$  – плотность потока метеорных тел массой больше  $m$ ,  $m^{-2} c^{-1} (4\pi_{\text{ср}})^{-1}$ ;  $S$  – показатель распределения тел по массе.

Для спорадических метеорных тел  $S=2,2$ .

Для тел, принадлежащих метеорным потокам,  $S=1,8$  и  $m_0=10^{-3}$  г.

Аналоги, существующие сегодня, например, от NASA (MEM – Meteoroid Environment Model) и ESA (Meteoroid and Debris Models), благодаря службам, специально созданным, в этих агентствах, обновляются каждый год. В частности, это усовершенствование моделей NASA [NASA-SP-8013], Near Earth and Lunar Surface (1969 г.) и NASA-SP-8038, Interplanetary and Planetary (1970 г.)). Построенная по канадским данным радиолокационных исследований комет, модель MEM (Jones, 2004), имеет ограничения по массе в 10-6-10 г. И по расстоянию в 0,2 – 2 а.е.

Модель ORDEM-2000 показывает хорошие результаты в диапазонах расстояний от Земли в интервале выше 200 км и ниже 2000 км. Прогноз для: 1991-2030 гг. Модель Master-2001 (ESA Meteoroid and Space debris Terrestrial Environment Reference) может применяться для исследования околопланетного пространства от низких орбит до высоты геостационарной орбиты. Прогноз для: 1960-2050 гг. Отличие Master-2001 от ORDEM-2000, в том, что плотность потока — это поток частиц через поверхность некоторого объекта сферической формы (с единичной площадью поперечного сечения  $1 \text{ м}^2$ ).

Стандарт ESA Space Engineering. Space Environment включает в себя несколько моделей, а именно:

Модели распределения межпланетной пыли (*Divine-Staubach*, MEM, IMEM);

Модели для Луны и точек Лагранжа, на расстоянии 1 а. е. [15];

Модель (IMEM (*Dikarev, 2003*)) для промежутка от 0,1 до 10 а. е. (масса до  $10^{-18}$  – 1 г);

Модели, учитывающие эффекты соударений метеороидов, астероидов и комет;

Модели для учета эффектов Пойтинга-Робертсона

Модели, построенные по данным межпланетных миссий (Galileo, Ulysses), распределения межзвездной пыли

Дополнительные эффекты, такие как эффект затенения метеорного потока Землей, эффект гравитационной фокусировки [18], временной профиль метеорного потока [14] и ряд других особенностей рассматриваются в дополнениях моделей [25].

К примеру, общий фактор  $G_0$ , учитывающий затенение и притяжение метеороидов Землей, увеличивается с приближением к ней.

Прогнозирование характеристик потоков метеороидов, имеющих различное происхождение, с помощью всех вышеуказанных моделей, дает уверенно подтверждаемые результаты.

Однако различия между моделями вполне заметны (рис. 7). В связи с чем, очевидна необходимость дополнительных исследований с целью выбора наиболее коррелирующей с экспериментальными данными модели распределения метеороидов в пределах Солнечной системы [16].

Построение модели метеорного вещества, рационально объясняющей их распределение в пространстве около Земли, сталкивается с проблемой получения информации о распределении масс метеороидов.

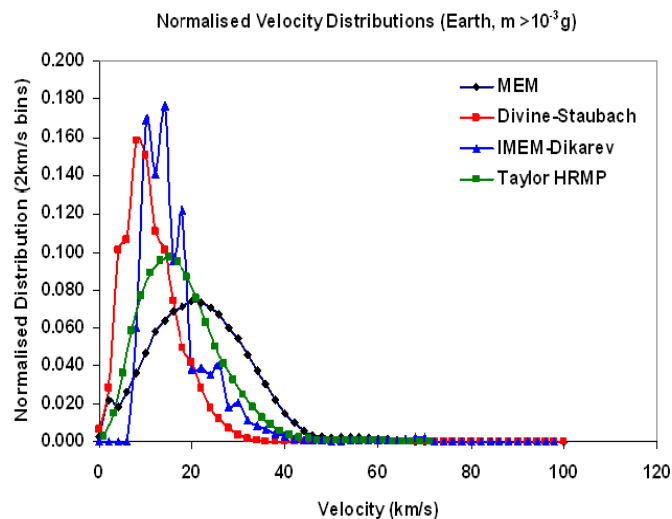


Рис. 7. Нормированное распределение скоростей метеороидов в различных моделях [16]

Установлено, что метеорные тела по массам распределяются по следующему степенному закону (распределение Парето):

$$N_m = N_0 m^{-S}, \quad (12)$$

где  $N_0$  — число метеорных тел единичной массы,  $N_m$  — число тел массы  $m$  и большей,  $S$  — интегральный масс-индекс.

Соотношение (12) применимо, если параметры метеоров (скорость и зенитное расстояние) стабильны, и соответственно светимость метеора пропорциональна  $m^S$ . Таким образом увеличение потока метеоров в 2,5 раза, соответствует увеличению на 1 единицу звездной величины, при  $S=2.0$ .

Распределение метеорных тел по массе, по наблюдениям с помощью визуальных и фотографических методов, данных радиолокации и датчиков соударения на ИСЗ представлено на сводном на рисунке 8 [7].



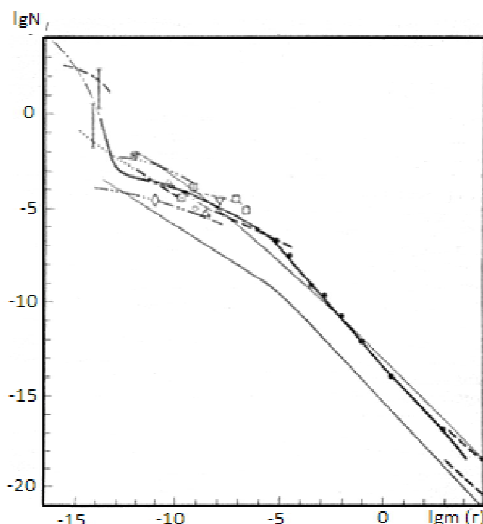


Рис. 8. Распределение метеорных тел по массе [7].  
 $N$ —число частиц на квадратный метр в секунду с небесной полусферы

Принятая здесь теоретическая модель распределения проведена сплошной линией. Излом этой кривой около  $M=10^{-6}$  г и заметный прогиб в интервале масс  $10^{-11}$ — $10^{-15}$  г происходят за счет эффекта Пойнтинга—Робертсона.

Показательный закон (12), к сожалению, является не более чем удобной формой аппроксимации. Статистика, собранная на большом массиве наблюдательных данных, свидетельствует, что  $S$  постоянна на диапазоне  $0^m$  -  $4^m$ , обычном для визуальных метеоров. Поведение функции светимости метеоров за пределами данного интервала не определено.  $S$ , как очевидно из общих соображений, на большом интервале  $M$  оставаться постоянной не может. Так как в таком случае плотность потока метеоров стремится к бесконечности.

Можно отметить, что наибольшая неопределенность в определении потока метеороидов наблюдается в области масс, больших  $10^{-2}$  г, что как раз соответствует нижней границе опасных метеороидов при блеске ярче  $0^m$  (рис. 9). Это связано, по-видимому, с нарастанием неравномерности распределения метеороидов в потоках при росте их массы и уменьшении плотности потока [3, 16].

С другой стороны, многие исследователи отмечают, что, когда визуальные методы фиксируют повышенную активность метеорных потоков, данные телевизионных и радиолокационных методов такую активность могут не подтвердить. В отдельных случаях максимумы визуальных, фотографических, радиолокационных и телевизионных метеоров не совпадают [6, 21, 23].

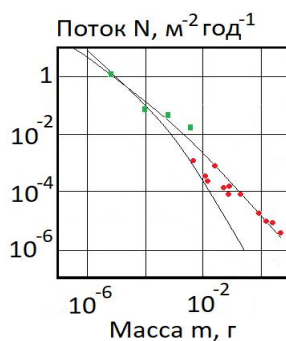


Рис. 9. Неопределенность в определении потока опасных метеороидов

Современные телевизионные измерения светимости метеоров имеют заметно более высокую фотометрическую точность, чем визуальные (порядка фотографической  $\sim 5\%$ ), од-

нако отличаются от тех и других положением нуля-пункта. Радиолокационные измерения энергии метеорных явлений имеют точность ниже в сотни и тысячи раз.

Для устранения этой неопределенности возникает необходимость приведения к единому стандарту все виды мониторинга метеорных явлений.

### Выводы

В настоящее время для оценки метеорной обстановки в NASA используется модель Meteoroid Engineering Model (MEM) (SEE/CR-2004-400), включающая в себя распределение скоростей метеороидов в функции их массы; поток метеороидов с массой более 100 мк; эффект от плазмы, образующейся при ударе очень маленьких частиц, имеющих очень большую скорость изменения пространственной плотности метеороидов в зависимости от их скорости [16, 22].

Европейское Космическое Агентство использует в своей работе IMEM - Interplanetary Meteoroid Engineering Model [15].

Для расчета активности метеорных потоков используются различные модели потоков, как например, MSFC Meteoroid Stream Model [13], позволяющие рассчитать поток метеороидов в окрестностях Земли и часовые числа метеоров на конкретные даты в период действия метеорных потоков. Здесь при получении выражения для риска отказа техники в результате удара микрометеороида использована модель вращающегося вокруг Солнца малого тела, учитывающая эффект Пойнтинга-Робертсона.

Эти модели являются основой информационных систем состояния околоземного пространства и метеороидного риска (Международное метеорное общество, департамент «Метеороиды» НАСА).

На текущий момент ГОСТ 25645\_128-85 «Метеорное вещество» несколько устарел. Отечественные исследования метеорных явлений должны создать базу для его обновления. Современные данные, основанные на телевизионных, достаточно точных и не субъективных (что присуще интерпретациям, основанным на визуальных наблюдениях), методах, а также технических возможностях оценивать параметры метеоров в реальном времени, должны лечь в основу новой редакции модели метеорного вещества в ближнем космосе [11, 12].

### Библиографический список

1. Андреев В.В., Бабаджанов П.Б. и др. Вещество метеорное. Модель пространственного распределения. ГОСТ 25645.128-85. – 1985. – 24 с.
2. Багров А.В., Выгон В.Г., Бондарь С.Ф. Задачи оперативных наблюдений тел естественного происхождения, движущихся через околоземное космическое пространство // Околоземная астрономия-2003. – СПб: 2003. Т. 2. – С. 29-41.
3. Бодрова И.В., Муртазов А.К. Метеороидный риск в околоземном пространстве // Аэрокосмическое приборостроение. – 2020. № 6. – С. 14-21.
4. Васильев В.В. Метеорная опасность // Космические аппараты. Под ред. проф. К.П. Феоктистова - М: Воениздат, 1983.
5. Бусарев В.В., Шевченко В.В., Сурдин В.Г. Физические условия вблизи Луны и планет Солнечной системы // Модель космоса. Т. 1 / Под ред. М.И. Панасюка. – М.: КДУ, 2007. – 63 с.
6. Ефимов А.В., Жабин В.С., Муртазов А.К. Широкоугольные ПЗС-наблюдения ярких Персеид в Рязани: Тезисы научной конференции с международным участием «VIII Бредихинские чтения». Заволжск. 4-8 сентября 2023. – С. 31-32.
7. Лебединец В.Н. Пыль в верхней атмосфере и космическом пространстве. Метеоры. – Л: Гидрометеоиздат, 1980. – 247 с.
8. Миронов В.В., Толкач М.А. Модели метеороидной среды в околоземном космическом пространстве и определение плотности потока метеороидов // Космическая техника и технологии. – 2017. № 2(17). – С. 49-62.
9. Миронов В.В., Толкач М.А. Скорость и распределение скорости метеороидов и частиц космического мусора в околоземном космическом пространстве // Космическая техника и технологии. – 2022. № 1(36). – С. 125-143.
10. Миронов Вал. В., Муртазов А. К., Усовик И. В. Системные методы мониторинга околоземного космического пространства. — Рязань: Book Jet, 2018. — 350 с.
11. Муртазов А.К. Естественное загрязнение околоземного пространства как экологический фактор //

Экологические системы и приборы. – 2011. № 8. - С. 8-13.

12. Муртазов А.К., Багров А.В. Модели естественного загрязнения околоземного пространства // Экологические системы и приборы. – 2013. № 1. – С. 28-34.

13. Cooke W. J., Moser D. E., Moorhead A. V. Spacecraft risk posed by the 2016 Perseid outburst: International conference Meteoroids-2016. - Noordwijk, the Netherlands.

14. Cour-Palais B. G. Meteoroid Environment Model-1969. - NASA SP-8013, 1969.

15. Dikarev V., Grün E., Baggaley J., Galligan D., Landgraf M., Jehn R. The new ESA meteoroid model. Advances in Space Research. – 2005, Vol. 35, Issue 7. – P. 1282-1289.

16. Drolshagen G., Dikarev V., Landgraf M., et al. Comparison of Meteoroid Flux Models for Near Earth Space. Earth, Moon, and Planets. – 2008, Vol. 102, Issue 1-4. – P. 191-197.

17. Efimov A.V., Murtazov A. K., Zhabin V.S. 15 years of bright Perseids wide-angle CCD observations. In: Meteoroids 2022 International Conference, June 13–17, 2022, Huntsville, Alabama, USA. Abstract 6005.

18. Grun A.F., Zook H.A., Fechtig H., Giese R.H. Collisional Balance of the Meteoritic Complex // Icarus. – 1985. Vol. 62. – P. 224-227.

19. Jones J., Brown P. The Radiant Distribution of Sporadic Meteors // Planetary and Space Sciences. – 1994. Vol. 42. n 2. – P. 123-126.

20. Kero J., Szasz C., Nakamura T., Meisel D.D., Ueda M., Fujiwara Y., Terasawa T., Nishimura K., Watanabe J. The 2009-2010 MU radar head echo observation programme for sporadic and shower meteors: Radiant densities and diurnal rates. Monthly Notices of Royal Astronomical Society. 2012. Vol. 425. - P. 135–146.

21. Koseki M. What do we see as ANT, Apex and Toroidal sources? — What meteors are, where meteors came from, where meteoroids are going. WGN, the Journal of the International Meteor Organization. 2015, Vol. 43:5. – P.128-145.

22. McNamara H., Jones J., Kauffman B., et al. Meteoroid Engineering Model (MEM): A Meteoroid Model for the Inner Solar System. Earth, Moon, and Planets, 2004. Vol. 95, Issue 1–4. - P. 123–139.

23. Murtazov A.K., Zhabin V.S. CCD observations of Perseids in 2022. In: International Meteor Conference. 2023. Aug. 31-Sept. 3, Redu, Belgium.

24. Peterson C. Cloudbait Observatory Research Associate, DMNS. The Colorado All-sky Camera Network: IMC 2010. September 17, 2010.

25. Yrjölä I., Jenniskens P. Meteor stream activity. VI. A survey of annual meteor activity by means of forward meteor scattering. Astronomy and Astrophysics. 1998, Vol. 330. - P.739-752.

УДК 004.31; ГРНТИ 49.03.05

## **АНАЛИЗ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ АЛГОРИТМА БПФ НА CPU И GPU**

**Д.А. Гондин**

*Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, Россия, Владимир, dmitry.g1996@ya.ru,*

*Аннотация.* Рассмотрены отличия архитектур центрального и графического процессоров. Проведен эксперимент по измерению производительности вычислений с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье с применением центрального и графического процессора при различных параметрах. Приведены результаты измерения производительности.

*Ключевые слова:* цифровая обработка сигналов, быстрое преобразование Фурье, производительность, графический ускоритель

## **PERFORMANCE ANALYSIS OF FFT ALGORITHM ON CPU AND GPU**

**D.A. Gondin**

*Vladimir State University named after Alexander Grigorievich and Nikolai Grigorievich Stoletov, Russia, Vladimir, dmitry.g1996@ya.ru,*

*Annotation.* The differences between the architectures of central and graphic processors are considered. The experiment on measuring the performance of calculations with the use of algorithm of fast Fourier transform with the use of central and graphic processor at different parameters is carried out. The results of performance measurement are given.

*Keywords:* digital signal processing, fast Fourier transform, performance, graphic gas pedal.

Современные системы цифровой радиосвязи и обработки сигналов сталкиваются с растущей потребностью в высокопроизводительных вычислениях. Для обеспечения требований таких систем используются устройства на базе ПЛИС или специализированных микросхемах.

Быстрое преобразование Фурье, или FFT, представляет собой один из фундаментальных алгоритмов в области цифровой обработки сигналов. Оно используется во многих системах цифровой радиосвязи.

Цель данного исследования заключается в оценке применимости графических ускорителей (GPU) в цифровой обработке сигналов, на примере сравнительного анализа производительности алгоритма быстрого преобразования Фурье на GPU по сравнению с его выполнением на центральном процессоре (CPU). Эксперимент призван выявить наличие или отсутствие прироста производительности при использовании GPU.

### Архитектуры CPU и GPU

CPU обычно состоит из небольшого количества мощных вычислительных ядер (4–16) с высокой тактовой частотой, где каждое ядро способно выполнять свою индивидуальную задачу. Внутри CPU есть большие объёмы кэш-памяти и быстрый доступ к ОЗУ. На рисунке 1 представлена схема архитектуры CPU.

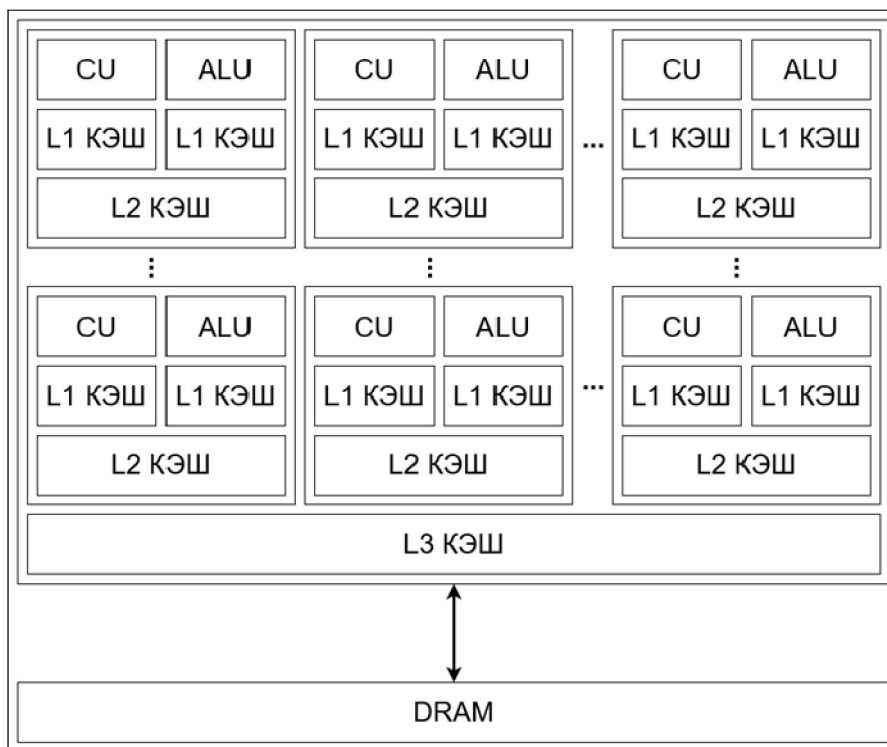


Рис. 1. Обобщенная архитектура CPU

В GPU же много более простых вычислительных ядер (тысячи штук), объединенных в кластеры, обычно по 32 или 64 штуки. Такие кластеры называются варпы (warp). В варпах у всех ядер общий указатель инструкций и каждое ядро работает над одной и той же задачей, только для своего участка данных. У GPU своя собственная оперативная память и кэш, причем оперативная память обычно быстрее чем у CPU, а размер кэша меньше. Загрузка данных в GPU обычно происходит через шину PCI-E с более низкой пропускной способностью по сравнению со скоростью доступа к оперативной памяти. Схема архитектуры GPU представлена на рисунке 2.

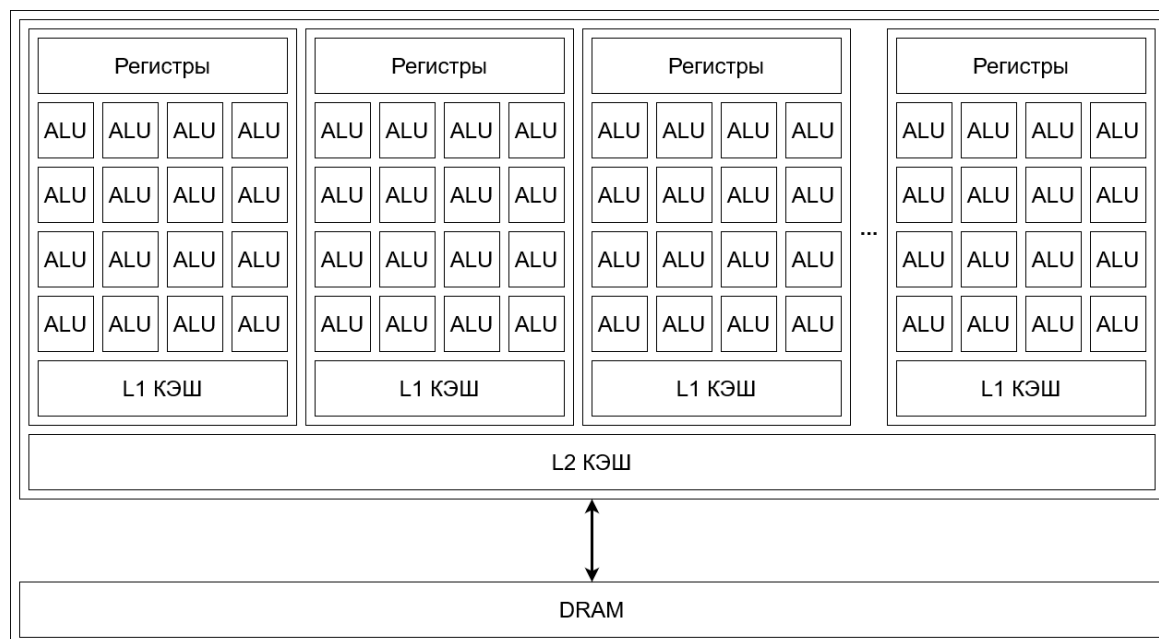


Рис. 2. Архитектура GPU

Такая организация вычислительных ресурсов теоретически удобна для решения задач массового параллелизма с использованием принципа SIMD, например, быстрого преобразования Фурье, цифровых фильтров и прочих алгоритмов обработки сигналов.

### Проведение эксперимента

В проводимых испытаниях использовался ПК под управлением ОС ArchLinux и обладающий следующей конфигурацией:

- Процессор Intel Core i5 8400
- Графический процессор Nvidia RTX 2060
- 16 ГБ оперативной памяти DDR4
- Жесткий диск типа SATA SSD

Суть эксперимента заключается в следующем: окно FFT выбирается с числом точек в пределах от 16 до 8192. Затем для выбранного числа точек в окне выполняется преобразование на буферах, содержащих от 1 окна до 10000 окон за один проход. После этого измеряется время в мс, затрачиваемое на выполнение данного преобразования. Во всех проведенных экспериментах используется комплексный сигнал с представлением в виде чисел с плавающей точкой размерностью 32 бита.

Для вычислений на центральном процессоре (CPU) были задействованы следующие библиотеки:

liquid-dsp – открытая библиотека для цифровой обработки сигналов с открытым исходным кодом, написанная на C. Она включает в себя модуль для расчета быстрого преобразования Фурье [1].

fftW3 – свободно распространяемая библиотека для выполнения быстрого дискретного преобразования Фурье. Использует оптимизации в виде векторных процессорных инструкций [2].

Для вычисления на GPU использовалась библиотека clfft – библиотека, генерирующая код для OpenCL [3], оптимизированный под конкретную среду выполнения, который затем выполнялся на GPU [4].

### Результаты и анализ

Результатом проведения испытаний являются таблицы 1-3 с замерахми времени выполнения преобразований Фурье в миллисекундах. В столбцах указано количество окон на один проход, а в строках размер окна в точках.

Таблица 1. Замеры времени выполнения расчетов с использованием c1FFT

c1FFT	1	10	100	1000	10000
16	20	20	19	20	28
32	19	20	20	21	44
64	20	20	20	23	57
128	21	21	21	30	122
256	21	21	23	39	210
512	23	24	25	69	454
1024	25	25	41	199	1703
2048	34	33	87	581	5483
4096	67	60	235	1871	19214
8192	33	48	273	1855	18132

Таблица 2. Замеры времени выполнения расчетов с использованием fftw3

fftw3	1	10	100	1000	10000
16	3	1	4	39	366
32	1	1	7	65	683
64	1	1	6	57	551
128	1	2	12	104	1106
256	1	4	23	217	2124
512	1	22	47	447	4475
1024	2	14	104	1093	10322
2048	5	28	226	2245	22278
4096	12	112	659	6608	67654
8192	22	203	2037	21115	203603

Таблица 3. Замеры времени выполнения расчетов с использованием liquid-dsp

liquid-dsp	1	10	100	1000	10000
16	1	1	6	59	588
32	1	3	27	260	2674
64	1	6	53	528	5366
128	8	12	113	1122	11215
256	3	27	263	2673	26886
512	9	121	759	7799	76808
1024	17	155	1540	15813	155521
2048	35	324	3318	32684	323540
4096	78	751	7671	75272	755871
8192	207	1998	20366	201630	2018876

Для окон размером 16, 1024 и 8192 точек построим графики зависимости времени выполнения от объема данных (рисунки 2-4). По оси X указывается количество окон, по оси Y время выполнения преобразования в миллисекундах.

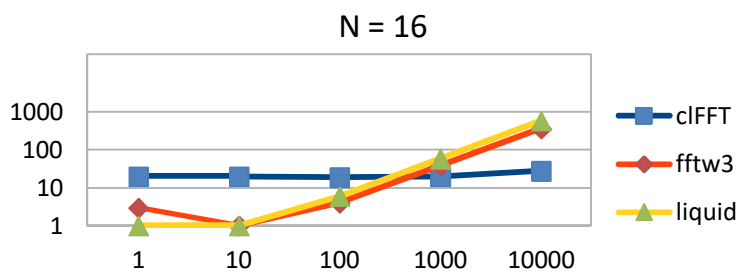


Рис. 2. Время выполнения вычислений при размере окна 16

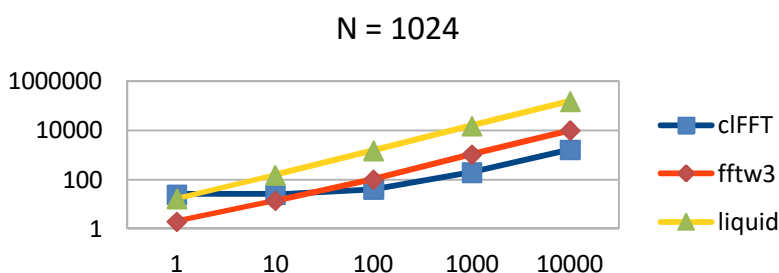


Рис. 3. Время выполнения вычислений при размере окна 1024

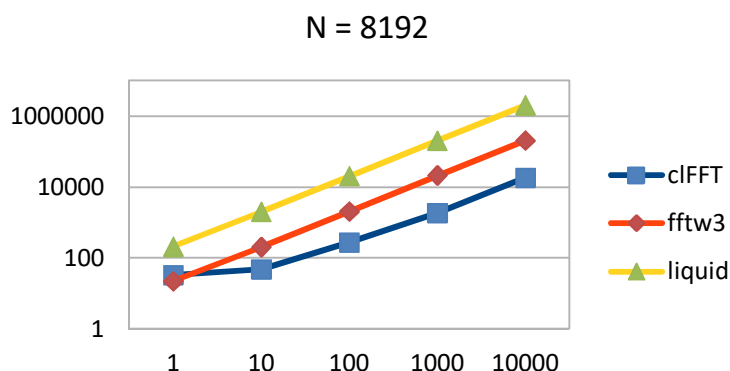


Рис. 4. Время выполнения вычислений при размере окна 8162

На малом объеме данных вычисления использование графического ускорителя не приносит прироста в производительности, а, наоборот, может привести к замедлению по сравнению с вычислением с использованием процессора. Такое поведение обусловлено накладными расходами при запуске вычислений на графическом процессоре.

На большом объеме скорость обработки превосходит вычисления на процессоре на порядки. Отправка как можно большего объема данных за один вызов сводит к минимуму накладные расходы на передачу. Таким образом графический ускоритель стоит рассматривать, как устройство с высокой пропускной способностью и высокой задержкой.

### Библиографический список

1. Fast Fourier Transform (fft) // Fast Fourier Transform (fft) URL: <https://liquidsdr.org/doc/fft/> (дата обращения: 16.09.2023).
  2. Фриго М., Джонсон С. С. FFTW / Фриго М., Джонсон С. С. // FFTW [Электронный ресурс]. – 2020.. – URL: <https://www.fftw.org/fftw3.pdf>. – Дата обращения: 16.09.2023.
  3. Khronos OpenCL Registry // Khronos OpenCL Registry - The Khronos Group Inc URL: <https://registry.khronos.org/OpenCL/> (дата обращения: 16.09.2023).
  4. OpenCL Fast Fourier Transforms (FFTs) // cIFFT: OpenCL Fast Fourier Transforms (FFTs) URL: <https://clmathlibraries.github.io/cIFFT/> (дата обращения: 20.10.2023).
- УДК 621.3.087.92; ГРНТИ 50.41.25

## ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ СИМУЛЯЦИИ СКАНИРОВАНИЯ ТОЧЕЧНОГО ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫМ ФОТОПРИЕМНИКОМ

Ю.С. Бехтин, А.А. Ильин

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, yuri.bekhtin@yandex.ru, for-ide@mail.ru*

*Аннотация.* В работе описывается программное обеспечение для симуляции сканирования точечного источника излучения многоэлементным фотоприемником и демонстрации работы вероятностного реле. Приводятся основные функции программы, элементы управления, а также отображаемые графики.

*Ключевые слова:* вероятностное реле, программное обеспечение.

## SOFTWARE FOR SIMULATION OF POINT OBJECT SCANNING BY A MULTI-ELEMENT INFRARED SENSOR

Y.S. Bekhtin, A.A. Ilyin

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, yuri.bekhtin@yandex.ru, for-ide@mail.ru*

*The summary.* The paper describes the developed software for simulation of the point object scanning process by a multi-element infrared sensor including the operation of a probabilistic relay. There are given the main software features, control elements, diagrams, etc.

*Keywords:* probabilistic relay, infrared sensor, software.

### Введение

Необходимость разработки специализированного программного обеспечения для имитационного моделирования работы вероятностного реле [1] обусловлена следующей задачей.

В настоящее время в системах радиоавтоматики и робототехники широко используются тепловизионные каналы для приема коротких управляющих световых сигналов, генерируемых лазерами. Такие световые сигналы распознаются многоэлементными фотоприемными устройствами (ФПУ) как точечные объекты излучения, диаметр светового пятна которых, как правило, согласован с размером фоточувствительной площадки (ФЧП) ФПУ [2-5]. В процессе сканирования линейкой ФЧП световое пятно может случайным образом располагаться относительно ФЧП, вызывая реакцию на выходе соответствующих электронных каналов ФПУ в форме колоколообразных импульсов. Обычно для упрощения в качестве математической модели таких импульсов используют функцию  $\cos^2$  [3 - 5]. В нашей работе [6] была получена «точная» математическая модель формируемых на выходе ФПУ импульсов от точечных объектов. Эта модель используется в рассматриваемом разработанном программном обеспечении. Преимущество разработанной модели по сравнению с известными моделями в том, что при случайном расположении светового пятна относительно двух ФЧП модель учитывает изменения не только амплитуды, но также формы и длительности канальных импульсов (рис. 1, а, б). Задача заключается в вычислении оценок амплитуд канальных импульсов и расположения светового пятна относительно ФЧП, что позволяет определять расстояние и координаты до объекта.

Решение такой задачи является сложным и многоэтапным процессом [7, 8], поскольку формируемые на выходе ФЧП электрические импульсы искажаются воздействием т.н. геометрического шума чувствительности (неоднородности коэффициентов передачи) и темнового тока (медленноменяющаяся низкочастотная помеха) в каждом канале ФПУ.

### Особенности программного симулятора вероятностного реле (ВР)

Для разработки программного обеспечения (ПО) использовалась бесплатная среда разработки Visual Studio 2022 Community Edition и язык программирования C#. Для разра-



ботки графического интерфейса пользователя использовались платформы AvaloniaUI и .NET 8.

Библиотеки языка C# и платформы .NET имеют большое количество свободно распространяемых библиотек, которые могут быть использованы для связи с периферийными устройствами, что позволяет использовать данную библиотеку в реальных задачах, заменив генерируемый сигнал на сигналы, которые можно получить от периферийного устройства.

Также платформа .NET 8 и кроссплатформенная библиотека AvaloniaUI, которая используется для создания пользовательских интерфейсов на различных платформах, позволяют без изменения исходного кода изменять библиотеки для таких операционных систем как Windows, Linux, MacOS.

Для отображения графиков использовалась библиотека с открытым исходным кодом OxyPlot.

Программное обеспечение (ПО) состоит из двух модулей. Первый модуль генерирует входной сигнал в соответствии с математической моделью из работы [6] и передает ее второму модулю ПО через протокол TCP. Второй модуль обрабатывает входной сигнал с использованием вероятностного реле.

На рисунке 1, в световое пятно обозначено в виде круга, диаметр которого равен размеру ФЧП. Сами ФЧП представлены в форме квадратов. Области попадания светового пятна на ФЧП закрашены соответствующими контуру каждой ФЧП цветами.

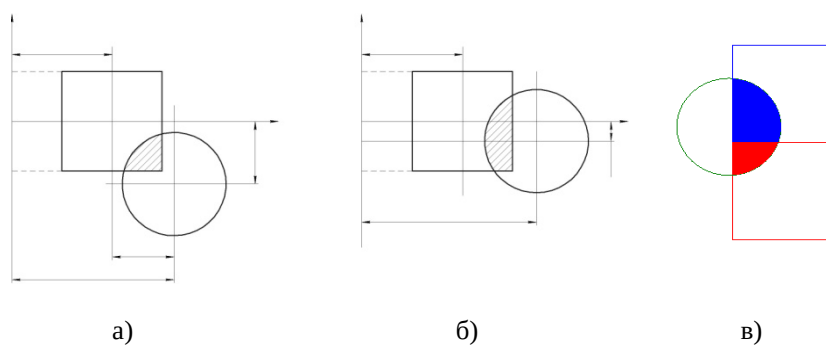


Рис. 1. Две ситуации взаимного расположения светового пятна и ФЧП и их визуализация

На рисунке 2 показаны поля для задания параметров симуляции сканирования точечного источника излучения многоэлементным фотоприемником. Параметры YOR, R, V описаны в статье [6]. Параметр «Кол-во отсчетов на импульс» определяет, сколько точек отсчета будет браться за один импульс, параметр «Скорость» определяет, сколько точек отсчета будет сгенерировано за одну секунду.

Рис. 2. Панель задания параметров работы симуляции сканирования

На рисунке 3 показан суммарный сигнал с двух ФЧП, а на графиках «Входной сигнал 1» и «Входной сигнал 2» сигналы, поступающие с первой и второй ФЧП соответственно.

На рисунке 4 показаны поля для задания параметров работы вероятностного реле. При задании параметра новое значение сразу же применяется и вероятностное реле продолжает работу уже с новыми параметрами.

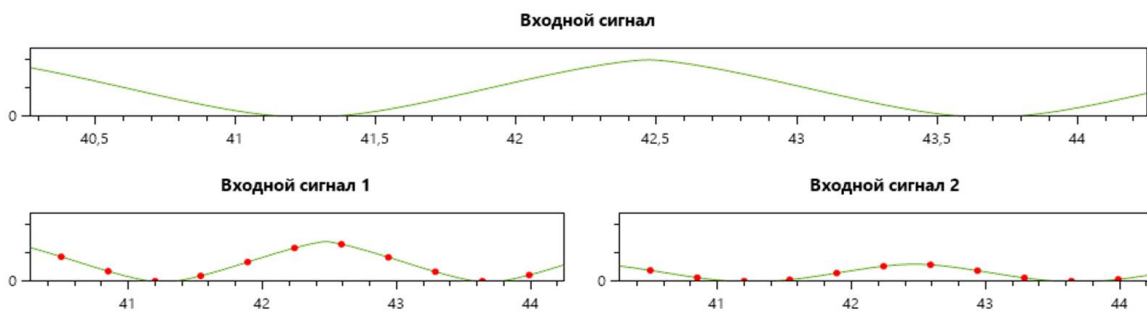


Рис. 3. Отображаемые модулем симуляции графики

abr	kbr
<input type="text"/>	<input type="text"/>
p01	p10
<input type="text"/>	<input type="text"/>
bk	
<input type="text"/>	

Рис. 4. Панель задания параметров работы вероятностного реле

На рисунке 5 на графиках «Входной сигнал 1» и «Входной сигнал 2» показаны сигналы, поступающие с модуля симуляции.

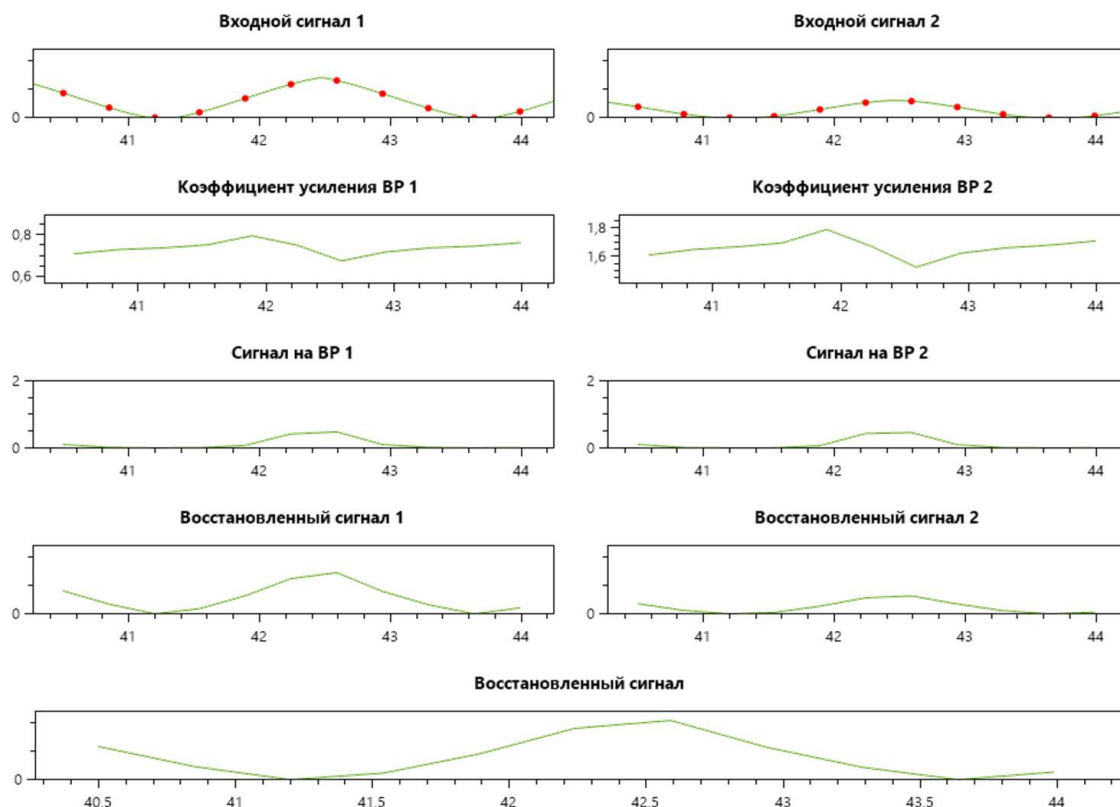


Рис. 5. Графики, отображаемые модулем обработки

На графиках «Коэффициент усиления ВР 1» и «Коэффициент усиления ВР 2» показаны коэффициенты усиления на первом и втором вероятностных реле. На графиках «Сигнал на ВР 1» и «Сигнал на ВР 2» показаны выходные сигналы на первом и втором вероятностных реле.

На графиках «Восстановленный сигнал 1» и «Восстановленный сигнал 2» можно увидеть восстановленные сигналы на каждом вероятностном реле, а на графике «Восстановленный сигнал» показан суммарный восстановленный сигнал.

Данные, передаваемые между модулями симуляции и обработки, строго типизированы, и их структура определена в отдельной библиотеке. Данную библиотеку можно подключить к любой программе, реализованной при помощи платформы .NET, благодаря чему можно подать на модуль обработки данные с различных физических устройств либо другого генератора сигналов.

### **Заключение**

Таким образом, разработанное ПО симулирует сканирование точечного объекта многоэлементным ФПУ, обработку его выходных сигналов с использованием вероятностного реле [7, 8]. Предполагается, что ПО ускорит настройку параметров соответствующих алгоритмов обработки, в результате чего будут эффективно решаться вторичные задачи, связанные с определением расстояния до точечного объекта и его координат.

### **Библиографический список**

1. А.с. (патент) (СССР) № 605317/ Оpubл. в БИ № 16, 1978. Активное вероятностное реле. Коршунов Ю.М., Симкин А.В., Филатов Ю.А.
2. Haykin S., K. J. Ray Liu. Handbook on array processing and sensor networks // John Wiley & Sons. 2010. V. 63. pp. 102-107.
3. Katsuhiko O. Modern Control Engineering. Fifth Edition, Prentice Hall, 2010.
4. Norton P.C., Horn S. Third generation infrared imagers // Proceeding SPIE. 2000. V. 4130. pp. 226-235.
5. Левшин В.Л. Пространственная фильтрация в оптических системах пеленгации. М.: Советское радио, 1971. 200 с.
6. Бехтин Ю.С., Филатов Ю.А, Ильин А.А., Ширабакина Т.А. Математическая модель реакции сканирующего оптико-электронного анализатора на точечный объект в телекоммуникационных системах. Телекоммуникации, № 6, 2021. С. 2-9.
7. Yu. Bekhtin, Yu. Filatov, A. Pyin. Compensation of IR-sensor Fixed Pattern Noise during Point Object Magnitude Recovering. GraphiCon 2022: труды 32-й Междунар. конф. по компьютерной графике и машинному зрению (Рязань, 19–22 сент. 2022 г.). М.: Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 2022. DOI: 10.20948/graphicon-2022-604-612. С. 604-612.
8. Y. S. Bekhtin, Y. A. Filatov and A. A. Lupachev, "Digital Stabilizing Pulse Signals on the Base of their State Estimators under Noise Environment," 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia, 2019, pp. 1-7. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8933874.

УДК 004.932; ГРНТИ 50.37

## **ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ДЕТАЛИ**

**В.С. Астапов, П.В. Бабаян**

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, vlad.astapov.00@mail.ru*

*Аннотация.* В данной работе рассматривается алгоритм функционирования системы машинного зрения для оценивания геометрических параметров детали. Приводится краткое описание используемых блоков системы визуального проектирования, применяемых при обработке изображения, представлено описание метода измерения. Описана процедура проведения эксперимента и результаты экспериментальных исследований.

*Ключевые слова:* система технического зрения (СТЗ), обработка изображений, оценка параметров.

## APPLICATION OF TECHNICAL VISION SYSTEM FOR ESTIMATION OF THE GEOMETRIC SIZE OF A PART

V.S. Astapov, P.V. Babayan

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, vlad.astapov.00@mail.ru

*The summary.* The paper considers the algorithm of the vision system for estimating the parameters of a part. A brief description of the blocks used is provided. An optical measurement method with a brief description is also considered. In addition, the experimental data obtained were presented and the method of conducting the experiment was described.

*Keywords:* Technical vision system, image processing, parameter estimation.

Разработка систем технического зрения (СТЗ) является одной из важных задач для осуществления автоматизированного контроля качества деталей, применяемых в машиностроении [1]. СТЗ используется для получения информации об анализируемом изделии на основе их изображений. Достоинством методов контроля, основанных на СТЗ, является бесконтактность и высокая точность [2,3]. Важным при разработке алгоритма функционирования СТЗ является определение положения и ориентации детали для дальнейшего точного получения интересующих изготовителя деталей измеряемых параметров [4]. В промышленности в основном СТЗ применяются на поточных линиях, где изготавливаются достаточно простые изделия (детали), такие как трубы, ленты и так далее. Широко применяются СТЗ для чтения штрих-кодов. Основными задачами, решаемыми алгоритмами, реализованными в СТЗ, являются:

1. Распознавание детали независимо от её положения и угла поворота.
2. Измерение физических параметров с детали определенной точностью.
3. Передача полученных данных в систему управления.

В данной работе объектом контроля является масляный стакан, который используется при сборке поршня для двигателей типа Д49 с размерностью 26/26, и служит для передачи масла под давлением через отверстие в головке шатуна в масляную полость охлаждения головки поршня. На рисунке 1 изображена 3D модель масляного стакана.

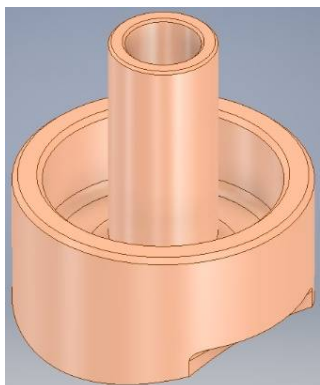


Рис. 1. Изображение 3D модели масляного стакана

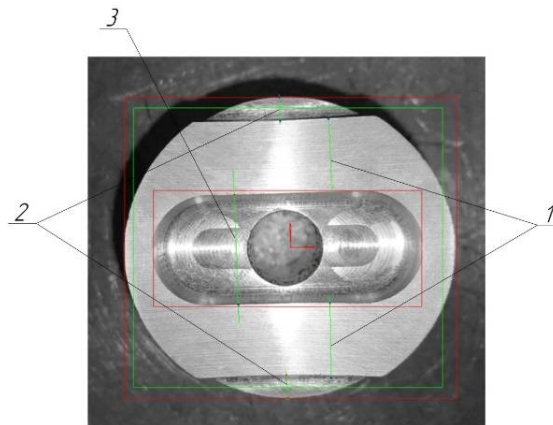


Рис. 2. Изображение масляного стакана, отображаемое в программе Vision Builder 3.0

Для разработки алгоритмов функционирования СТЗ широко применяются такие инструментальные программные средства как библиотеки Matrox Imaging library, OpenCV (реализации для C++ и Python), среда разработки Matlab (включающая расширения Image Processing Toolbox, Image Acquisition Toolbox). Для разработки алгоритма в данной работе было использовано программное обеспечение (ПО) Vision Builder AI 3.0, которое, в отличие от аналогов, не требует знания языков программирования, содержит множество готовых блоков, предоставляет широкие возможности тестирования и управления технологическим оборудованием.

Целью работы СТЗ является нахождение геометрических размеров детали. В нашем случае это расстояние от нижнего края проточки масляного стакана до грани паза, размер паза от одного края до другого, размер диаметральный, размер проточки. Деталь имеет цилиндрическую форму, поэтому, прежде всего, необходимо найти все грани объекта и две точки, которые образуют центральную ось масляного стакана. На рисунке 2 представлено изображение масляного стакана, сформированное СТЗ, где цифрами обозначены:

1. Поверхность прилегания (расстояние от нижнего края проточки масляного стакана до грани паза).
2. Проточка.
3. Паз.

Разработка алгоритма обработки изображений проводилась в программе Vision Builder AI 3.0. Опишем основные настройки блоков программы, используемых в алгоритме.

Блок (модуль) обнаружения объектов “Detect objects” настроен на поиск объекта по шаблону, выбираемому на одном из наблюдаемых изображений. Задан максимальный угол поворота эталона в градусах не более  $40^\circ$ . Экспериментальным путем было установлено подходящее пороговое значение степени соответствия эталона изображению – 1000.

Модуль для задания системы координат “Set Coordinate System” определяет систему координат таким образом, чтобы она могла смещаться и поворачиваться при повороте и смещении изделия.

В программном пакете Vision Builder AI 3.0 по умолчанию все размеры и расстояния указываются в пикселях. Для преобразования размеров в миллиметры модуль “Calibrate Image” настраивается таким образом, что производит вычисления, используя расстояние между двумя точками в пикселях, оцененное при помощи блока Find Edges.

Блок FindEdges настраивается так, чтобы система определяла только один край – “First Edge Only”, при переходе с темного фона на светлый – “Dark to Bright Only”, амплитуда перепада составляет порядка 55, величина сглаживания 2 и 0, максимальное и минимальное количество краёв, определяемое системой, принимается равным 1.

Блок “Calibrate Image” настроен на измерение размеров в миллиметрах, при этом для годной детали измеренное расстояние должно составлять порядка 49 мм.

Блок “Geometry” настраивается таким образом, что соединяет определенные точки и производит замер расстояния между ними в миллиметрах, используя параметр дистанции, задаваемый в блоке “Distance”.

На рисунке 3 приведен алгоритм функционирования системы технического зрения для оценки параметров детали, спроектированный в Vision Builder 3.0.



Рис. 3. Алгоритм работы СТЗ для оценки параметров детали

Для повышения качества оценивания параметров при создании алгоритма предложено использовать дополнительную предварительную обработку изображений. Для этого использовался блок “NI Vision Assistant”.

Настройка предварительной обработки производилось таким образом, чтобы увеличить контраст детали на изображении стакана, затемнить фон вокруг него. Для этого с помощью блока “RGB-Red plane” выделена красная компонента цветовой модели RGB. Обработка в разных палитрах помогло выделить области с высокой интенсивностью, повысить интенсивность резких переходов. Блок “Lookup Table-Power X” использован для увеличения контраста изображения и затемнения фона. При помощи блоков работы с гистограммами определены более резкие области перехода цветов в серые оттенки, иными словами, на основе гистограммы вычислены два признака: насыщенность и контраст, что при обработке позволило нам увеличить четкость и контраст измеряемой детали. Изображение, прошедшее предварительную обработку, представлено на рисунке 4. Цифрами на рисунке обозначены:

Позиция 1 - расстояние от нижнего края проточки масляного стакана до грани паза.

Позиция 2 - размер проточки.

Позиция 3 - размер паза от одного края до другого.

Таким образом, представленный алгоритм позволяет решить задачу автоматического контроля деталей в машиностроительном производстве, помимо этого ускоряет, а также упрощает работу служб ОТК (отдел технического контроля) завода, что также позволяет уменьшить количество бракованных изделий, отправляемых на дальнейшую сборку.

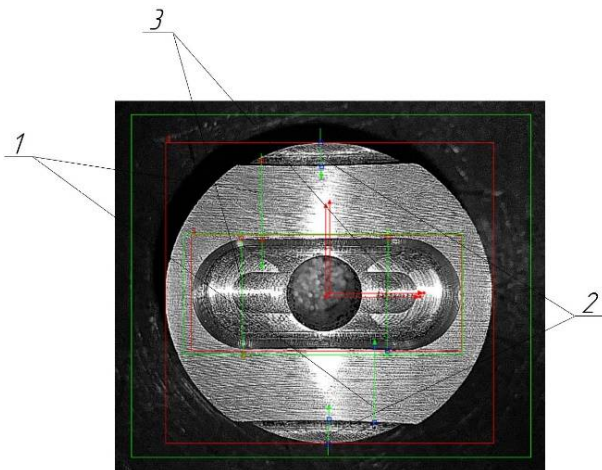


Рис. 4. Изображение масляного стакана, прошедшее предварительную обработку

### Библиографический список

1. Астапов В.С. Алгоритм работы системы технического зрения для оценки параметров детали// XXVIII Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов (НИТ-2023): сб.тр.-Рязань: РГРТУ, 2023.-с.132.
2. Колочкин В.Я., Нгуен К.М., Чан Т.Х. Алгоритмы обработки информации в системах технического зрения промышленных роботов. Инженерный журнал: наука и инновации, 2013, вып. 9.
3. Алпатов Б.А., Бабаян П.В. Технологии обработки и распознавания изображений в бортовых системах технического зрения // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – Рязань. – 2017. – №2. – С.34-44.
4. Бабаян П.В., Серегина Н.В. Сегментация изображений полуфабрикатов кожи // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2010. – №4. – С.8-12.



УДК 004.82; ГРНТИ 28.23.13

## СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ АССОЦИАТИВНОЙ ПАМЯТИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Д.С. Соловьев

Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина,  
Россия, Тамбов, solovjevdenis@mail.ru

*Аннотация.* В работе рассматривается проблема поиска управления для функционирования технических объектов. Для ее решения предлагается использовать интеллектуальную систему управления на базе ассоциативной памяти. Эта система позволяет учитывать неопределенность значений входных переменных и обеспечивает допустимые потери качества процесса. При построении ассоциативной памяти используется аппроксимация оптимальных критериев аналитической зависимостью и определение изолиний. Для поиска подходящей строки в ассоциативной памяти предлагается использовать быстродействующий алгоритм на основе нормализации векторов и выбора кластера с минимальным расстоянием до измеренного вектора. Использование данного подхода позволит повысить эффективность производства и уменьшить стоимость управляющего устройства.

*Ключевые слова:* интеллектуальная система управления, ассоциативная память, неопределенность, структурно-параметрический синтез, технический объект.

## STRUCTURAL-PARAMETRIC SYNTHESIS OF AN INTELLIGENT CONTROL SYSTEM BASED ON ASSOCIATIVE MEMORY UNDER CONDITIONS OF UNCERTAINTY

D.S. Solovjev

Derzhavin Tambov State University,  
Russia, Tambov, solovjevdenis@mail.ru

*Abstract.* The paper addresses the problem of searching control for the technical objects operation. An intelligent control system based on associative memory to solve this problem is proposed. This system allows for the uncertainty of input variable values and provides acceptable process quality losses. When constructing associative memory, an approximation of optimal criteria is used by analytical dependence and determination of isolines. To search for a suitable string in associative memory, a high-speed algorithm based on vector normalization and cluster selection with minimum distance to the measured vector is proposed. The use of this approach will increase production efficiency and reduce the cost of the control device.

*Keywords:* intelligent control system, associative memory, uncertainty, structural-parametric synthesis, technical object.

Для улучшения эффективности производства с точки зрения повышения качества получаемой продукции применяется поиск оптимального управления для различных технологических процессов её изготовления. Для достижения оптимальных программных управлений существуют два подхода. Первый – это оптимальное управление в режиме реального времени, которое отыскивается до начала функционирования объекта управления или в процессе его работы. Второй – это поиск оптимального управления заранее для разных значений входных данных. Полученные таким образом результаты могут быть использованы для управления напрямую или представлены в виде формальных зависимостей между управляющими воздействиями и входными данными. Выбор подхода зависит от сложности вычислений, необходимых для поиска оптимальных управлений. Однако каждый из этих подходов имеет свои недостатки, такие как ограничения памяти и быстродействия вычислительных устройств или неопределенность значений входных переменных. Для решения данных недостатков предлагается использование интеллектуальной системы управления на базе ассоциативной памяти. Основные принципы интеллектуальной системы управления на базе ассоциативной памяти включают [1]: 1) автоматическое обучение (система способна самостоятельно обучаться на основе опыта и данных, которые поступают в нее со временем); 2) ассоциативный поиск (система использует ассоциативную память для

быстрого поиска связей между различными данными и концептами); 3) контекстное понимание (система учитывает контекст и ситуацию, в которой происходит управление, чтобы принимать более точные решения); 4) автоматическое принятие решений (система способна автоматически принимать решения на основе своей ассоциативной памяти и контекстного понимания); 5) автоматическая оптимизация (система может автоматически оптимизировать свою работу на основе полученных данных и опыта); 6) распределенная обработка данных (система может работать с большим объемом данных, используя распределенную обработку на нескольких устройствах); 7) автоматическое обновление (система может автоматически обновлять свои знания и данные на основе новых входных данных). Целью работы является создание интеллектуальной системы управления техническими объектами в условиях неопределенности значений входных координат, которая обеспечивает допустимые потери качества технологического процесса.

Для оптимального управления техническим объектом на временном интервале, как правило, используется математическая модель (система уравнений, описывающая изменение его поведения). Эта система содержит векторы входных и выходных координат, а также вектор управляющих воздействий. В некоторых случаях не представляется возможным найти оптимальное управление и приходится использовать управление, найденное из ассоциативной памяти. Иногда возникают ситуации, когда невозможно измерить некоторые фазовые координаты, которые необходимы для нахождения оптимального управления, либо используется приближенный метод максимума в конечно-разностных схемах. Также может случиться, что найти функции оптимальных управлений для каждого начального состояния объекта управления становится невозможным. В таких ситуациях используются воздействия, которые наиболее близки к оптимальным.

Чтобы найти оптимальные управления для неизвестных начальных условий, предлагается сократить бесконечное множество значений входных координат до конечного множества, решив дискретное число задач поиска оптимального управления для выбранных значений. Результаты решения каждой задачи собираются в ассоциативную память матричного типа, которая сохраняется в вычислительном устройстве интеллектуальной системы управления, структурная схема которой приводится на рисунке 1.

Для поиска оптимального управления на техническом объекте используется предположение о близости векторов входных координат и их наборов оптимальных управляющих воздействий и критериев управления выходными координатами [2, 3]. В таком случае задача сводится к поиску управления из ближайшей строки в ассоциативной памяти матричного типа, которая обеспечивает выполнение ограничения на потери качества процесса. Для построения такой памяти необходимо сформировать таблицу оптимальных значений критериев с регулярным шагом, а затем аппроксимировать каждый критерий аналитической зависимостью. Затем определяются изолинии для каждой зависимости критерия и находятся значения при перемещении вдоль его из изолиний. Это позволяет найти наименьшую размерность строк в ассоциативной памяти, которая обеспечивает выполнение ограничения на потери качества процесса на техническом объекте.

Система управления начинает свою работу после того, как в управляющее устройство записана ассоциативная память матричного типа. После измерения значений входных координат и переменных состояния технологическими датчиками находится соответствующая строка из ассоциативной памяти и на исполнительные устройства выдаются управляющие воздействия ей соответствующие. Ассоциативная память может содержать множество строк, поэтому поиск нужной строки методом простого перебора может занять значительное время и привести к неудовлетворительной работе системы. Кроме того, значения входных координат и переменных состояния на техническом объекте не всегда совпадают с имеющимися в ассоциативной памяти, поэтому для обеспечения точного управления нужно найти строку, которая лучше всего соответствует измеренным значениям.



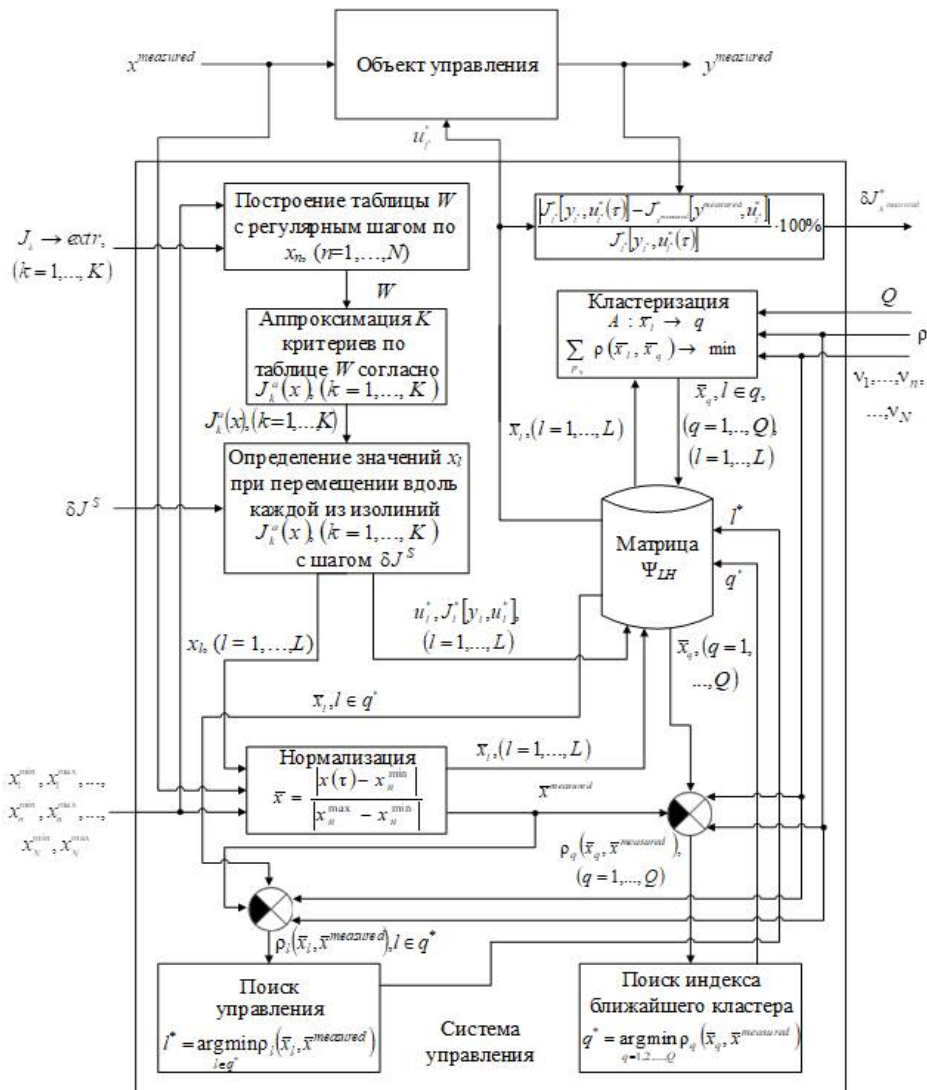


Рис. 1. Структурная схема интеллектуальной системы управления на основе ассоциативной памяти в условиях неопределенности

В связи с вышесказанным предлагается использовать быстродействующий алгоритм поиска управления. Для этого определяются границы изменения значений каждого компонента вектора управления и вводится нормализованный вектор, компоненты которого рассчитываются на основе границ изменения значений. Также осуществляется нормализация измеренного вектора. Для формализации расстояния между нормализованными векторами используются различные метрики, которые учитывают весовые коэффициенты каждой компоненты в соответствии с ее влиянием на критерий управления. Чтобы уменьшить количество просматриваемых вариантов строк в ассоциативной памяти, предлагается разбить ее на кластеры с помощью выбранного метода кластеризации и найти кластер, центр которого находится на минимальном расстоянии от нормализованного измеренного вектора. После этого производится решение задачи поиска подходящей строки и оценки соответствующего ей значения только среди строк, входящих в найденный кластер.

Важно отметить, что задачи наполнения строк ассоциативной памяти, их нормализации и кластеризации решаются только один раз при проектировании интеллектуальной системы управления, а решение задач поиска кластера и подходящей строки производится в процессе эксплуатации системы.

Использование алгоритмов с более простыми вычислениями в интеллектуальных системах управления на основе ассоциативной памяти позволит уменьшить стоимость управляющего устройства и использовать освободившиеся ресурсы для других задач. Данное об-

стоятельство повлечет за собой снижение энергопотребления или увеличение производительности, что в конечном итоге сделает процесс получаемой продукции более эффективным.

### Библиографический список

1. Макаров, И.М., Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления / И.М. Макаров, В.М. Лохин, С.В. Манько, М.П. Романов. – М.: Наука, 2006. – 333 с.
2. Карабутов, Н.Н. Модели адаптивного управления на базе ассоциативной памяти / Н.Н. Карабутов, В.М. Лохин, С.В. Манько, М.П. Романов, М.П. // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – № 12. – С. 11-17.
3. Романов, М.П. Высокоточная система управления для сборочных роботов на основе ассоциативной памяти / М.П. Романов // Вестник МГТУ МИРЭА. – 2015. № 3-1 (8). – С. 60-87.

УДК 004.332.34; ГРНТИ 50.11.01

## МИНИМИЗАЦИЯ КОЛИЧЕСТВА РЕСУРСОВ ПЛИС ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ БЛОЧНОЙ ПАМЯТИ ДЛЯ ЗАДАЧИ ОБРАБОТКИ ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ

**А.М. Аксенов**

*Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых  
Россия, Владимир, zanit33@yandex.ru*

*Аннотация.* В данной работе рассматривается подход к организации хранения данных с использованием минимального количества аппаратных блоков памяти фиксированного объема в ПЛИС фирмы Xilinx серии 7 Series. Рассмотрены общие аспекты каскадирования структурных единиц памяти (Block RAM), позволяющие эффективно (с точки зрения используемых ресурсов) организовать память на заданное количество слов определенной разрядности.

*Ключевые слова:* каскадирование памяти, программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС), блочная память (Block RAM)

## MINIMIZING THE AMOUNT OF FPGA RESOURCES WHEN ORGANIZING BLOCK MEMORY FOR THE TASK OF PROCESSING DIGITAL SIGNALS

**A.M. Aksenov**

*Vladimir State University named after Alexander Grigorievich and Nikolai Grigorievich Stoletov  
Russia, Vladimir, zanit33@yandex.ru*

*Annotation.* In this paper, we consider an approach to organizing data storage using a minimum number of fixed-size hardware memory blocks in Xilinx FPGAs of the 7 Series. The general aspects of cascading structural memory units (Block RAM) are considered, which make it possible to efficiently (in terms of resources used) build memory for a given number of words of the required bit depth.

*Keywords:* memory cascading, field-programmable gate array (FPGAs), block memory (Block RAM)

Сложно представить современный мир без систем телекоммуникации. Часто в качестве аппаратной основы подобных систем выбирают программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС), позволяющие параллельно обрабатывать большие объемы информации с достаточно высокой скоростью. На базе ПЛИС может быть реализована полноценная система цифровой обработки сигнала (ЦОС). Несмотря на это, не теряет актуальности вопрос эффективного использования имеющихся аппаратных ресурсов.

При организации ЦОС нередко возникает потребность в хранении данных. Например, память является неотъемлемой частью таких элементов ЦОС, как: цифровой генератор сигналов (NCO – numerically controlled oscillator), фильтры (для хранения коэффициентов) и многие другие [1]. Таким образом, эффективное использование ограниченного числа ресур-

сов памяти (и как следствие площади всего кристалла) становится важной задачей при проектировании устройств ЦОС.

Как правило, в ПЛИС присутствуют аппаратные блоки, позволяющие эффективно организовать хранение данных (с точки зрения производительности). Подобная память называется блочной (BRAM - block RAM). Очевидно, что данный ресурс имеет количественное ограничения. Целью текущей работы является описание подхода к построению памяти с использованием оптимального (наименьшего) числа ресурсов.

В ПЛИС фирмы Xilinx серии 7 Series блочная память строится на основе двух типов аппаратных ресурсов – RAMB18E1 и RAMB36E1. Данный блоки памяти представляют собой синхронную двухпортовую ОЗУ емкостью 18 Кбит ( $18 * 1024$ ) и 36 Кбит ( $36 * 1024$ ) соответственно. При построении памяти основной структурной единицей является блок RAMB36E1, который состоит из двух RAMB18E1.

Любая память имеет два ключевых параметра: глубину и разрядность данных. Под глубиной стоит понимать количество слов (данные определенной разрядности), которое может быть записано в память. Применительно к одному аппаратному блоку задание вышеописанных параметров является определением его конфигурации (в таблице 1 представлены поддерживаемые конфигурации для блоков обоих типов [2]).

Таблица 1. Конфигурации блоков

RAMB36E1	RAMB18E1
64К x 1	16К x 1
32К x 1	8К x 2
16К x 2	4К x 4
8К x 4	2К x 9
4К x 9	1К x 18
2К x 18	512 x 36
1К x 36	-
512 x 72	-

Краеугольным вопросом при проектировании памяти является вопрос каскадирования минимальных структурных единиц – блоков памяти, разобранных ранее. Под каскадированием стоит понимать объединение нескольких блоков памяти с заранее определенной фиксированной конфигурацией, позволяющее получить запоминающее устройства той емкости (количество хранимых бит), которая не может быть обеспечена одним блоком.

При каскадировании блоков может быть использована вспомогательная внешняя логика, основная задача которой заключается в следующем: исходя из значения, передаваемого по адресной шине, активировать определенные аппаратные блоки путем формирования управляющих сигналов и мультиплексирования шин выходных данных. В представленной работе внешняя логика не рассматривается.

RAMB36E1 имеет специализированные выводы, предназначенные для каскадного подключения нескольких блоков. Подобное подключение возможно лишь при объединении двух блоков с конфигурацией 1x32 Кбит (организуется память 1x64К). Каскадирование при других конфигурациях с использованием специальных выводов невозможно (в указанных версиях блоков). Очевидно, что подобный подход к организации памяти не является эффективным с точки зрения количества используемых ресурсов.

Например, если необходимо покрыть глубину в 45К при разрядности данных равной 8, потребуется задействовать 16 блоков RAMB36E1 (рисунок 1).

Данную задачу можно решить с использованием меньшего количества ресурсов. Важно отметить, что при подобной организации памяти у половины блоков используется лишь четверть доступной емкости ( $45К - 36К = 9К$  – у блоков из второго столбца), то есть большая часть памяти данных блоков не будет задействована. Если изменить способ организации памяти, представленный на рисунке 1, на эффективный с точки зрения ресурсов (рисунок 2), то потребуется задействовать лишь 11 блоков RAMB36E1 в конфигурации 8x4К (то же что и

9x4K). Также, при подобной организации хранения данных значительно уменьшится объем избыточной памяти (разница между требуемой глубиной и фактической).

45K

	1 x 36K	1 x 36K
	1 x 36K	1 x 36K
	1 x 36K	1 x 36K
	1 x 36K	1 x 36K
	1 x 36K	1 x 36K
	1 x 36K	1 x 36K
	1 x 36K	1 x 36K
	1 x 36K	1 x 36K
	1 x 36K	1 x 36K
	1 x 36K	1 x 36K

Рис. 1. Пример неэффективного способа построения памяти (8 x 45K)

45K

	8 x 4K	8 x 4K	8 x 4K	8 x 4K	8 x 4K	8 x 4K	8 x 4K	8 x 4K	8 x 4K	8 x 4K	8 x 4K
--	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Рис. 2. Пример эффективного способа построения памяти (8 x 45K)

Также стоит рассмотреть пример неоптимального построения памяти, когда разрядность данных превышает доступную разрядность одного блока. На рисунке 3 представлена память 60x7.5K.

7.5K

	4 x 8K
	4 x 8K
	4 x 8K
	4 x 8K
	4 x 8K
	4 x 8K
	4 x 8K
	4 x 8K
	4 x 8K
	4 x 8K
	4 x 8K
	4 x 8K
	4 x 8K
	4 x 8K
	4 x 8K
	4 x 8K
	4 x 8K

Рис. 3. Пример неэффективного способа построения памяти (60 x 7.5K)

7.5K

	9 x 4K	9 x 2K	18 x 1K	36 x 512
	9 x 4K	9 x 2K	18 x 1K	36 x 512
	9 x 4K	9 x 2K	18 x 1K	36 x 512
	9 x 4K	9 x 2K	9 x 2K	36 x 512
	9 x 4K	9 x 2K	9 x 2K	36 x 512
	4 x 8K			36 x 512
	2 x 8K			36 x 512

Рис. 4. Пример эффективного способа построения памяти (60 x 7.5K)

Из рисунка 3 видно, что для организации хранения данных потребуется 15 блоков типа RAMB36E1. Подобное каскадирование памяти не является эффективным по количеству используемых ресурсов. На рисунке 4 представлен другой вариант построения требуемой памяти.

Вариант организации памяти, представленный на рисунке 4, задействует 13 блоков памяти типа RAMB36E1. Таким образом, выигрыш в два аппаратных блока памяти примерно эквивалентен выигрышу в 72 Кбит.

Вышеописанные неэффективные (по использованию ресурсов) варианты каскадирования блоков памяти были получены с использованием базовых средств построения памяти, предоставляемых САПР Vivado 2021.2. Основная идея подобного подхода к организации хранения данных заключается в использовании специализированных выводов блоков, предназначенных для каскадирования, и задействовании малого числа конфигураций.

Для рассмотрения примера общего подхода к организации памяти с использованием наименьшего числа ресурсов выделим три множества конфигураций, исходя из разрядности данных:

- разрядность кратна 9 (9x4K/2K, 18x2K/1K);
- разрядность равна 4 (4x8K/4K);
- разрядность меньше 3 (2x16K/8K, 1x32K/64K).

Первые два множества представлены на рисунке 4. Основная задача каскадирования с использованием наименьшего числа ресурсов заключается в определении необходимых кон-

фигураций блоков. Таким образом, условно можно выделить следующие этапы каскадирования:

- оценить возможность построения памяти на одном блоке (как отмечалось ранее, RAMB36E1 имеет объем 36 Кбит, максимальная разрядность – 72 бита);
- выделить множества конфигураций (описанных выше), которые необходимо будет использовать, исходя из разрядности хранимых данных;
- в рамках каждого множества определить набор конфигураций, достаточный для обеспечения хранения требуемого количества слов заданной разрядности. Конфигурации в наборе должны быть ранжированы по глубине, то есть необходимо в первую очередь выделять конфигурации с наибольшей глубиной.

Используем данный подход для организации памяти 24x8.5К. Общий объем памяти (208896 бит) превышает объем одного блока (36684). Следовательно, одного блока будет недостаточно для построения памяти. Выделим множества конфигураций, которые были описаны ранее:

- первое множество: разрядность входных данных делиться на 9 с остатком. Таким образом, данное множество покрывает 18 разрядов.
- второе множество: оставшаяся разрядность ( $24-18=6$ ) делиться на 4 с остатком. Обеспечено 4 разряда хранимых данных;
- третье множество: покрывает оставшиеся 2 разряда.

Таким образом, используются все множества конфигураций. В рамках каждого множества необходимо выделить набор конфигураций, обеспечивающий требуемую глубину. Рассмотрим формирования набора для первого множества:

- возьмем конфигурацию с наибольшей глубиной – 9x4К. Данная конфигурация может быть использована, так как её глубина не является избыточной. Два подобных блока, установленных параллельно, обеспечат 18 разрядов. Осталось покрыть глубину равную 4.5К ( $8.5К - 4К = 4.5К$ );
- повторно рассмотрим конфигурацию 9x4К. Подобная конфигурация все еще может быть использована. Осталось обеспечить глубину в 512 слов ( $4.5К - 4К = 512$ );
- рассмотрим конфигурацию 9x2К. Глубина данного блока является избыточной (кроме того, потребуется два подобных блока для обеспечения хранения данных требуемой разрядности);
- возьмем конфигурацию 18x1К. Стоит отметить, что подобная конфигурация соответствует блоку RAMB18E1 (как и 35x512, и 9x2К), то есть используется минимальная структурная единица памяти. В данном случае подобная конфигурация является оптимальной как по глубине, так и по разрядности данных.

На рисунке 5 представлен пример покрытия глубины и разрядности для каждого множества конфигураций.

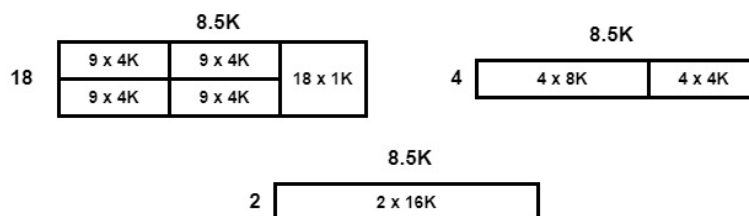


Рис. 5. Пример покрытия глубины

Рассмотренная выше память при использовании вышеописанного подхода к каскадированию блоков будет размещена в 14 блоках типа RAMB18E1 или в 7 блоках типа RAMB36E1. При использовании базовых средств организации блочной памяти в САПР Vivado та же память будет построена с использованием 12 блоков типа RAMB36E1 (в конфигурации 2x16К).

Таким образом, использование различных конфигураций аппаратных блоков памяти позволит сократить общее число задействованных аппаратных ресурсов, особенно при организации хранения большого количества данных.

### Библиографический список

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр; пер Грозы Е.Г.; под ред. А.В. Назаренко. – изд. 2-е, испр. – М. : Вильямс, 2004. – 1104 с.
2. 7 Series FPGAs Memory Resources User Guide / UG473 (v1.14) July 3, 2019 [Электронный ресурс]. – URL: [https://docs.xilinx.com/v/u/en-US/ug473\\_7Series\\_Memory\\_Resources](https://docs.xilinx.com/v/u/en-US/ug473_7Series_Memory_Resources) (дата обращения: 26.01.2024).

УДК 621.391; ГРНТИ 78.25.31

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ОБЪЕКТОВ НА ИЗОБРАЖЕНИИ ПРИ НАЛИЧИИ НЕСТАЦИОНАРНОГО ФОНА

**В.В. Костров, А.В.Ракитин**

*Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых,  
Российская Федерация, Муром, kostrov.46@mail.ru  
АО «Научно-исследовательский институт «Субмикрон»,  
Российская Федерация, Москва, Зеленоград, alexey.rakitin@mail.ru*

*Аннотация.* В работе рассматривается оценочно-компенсационный подход к обработке изображений для обеспечения постоянного уровня вероятности ложной тревоги (ПУЛТ процессор) в устройстве автоматического обнаружения объектов. В основу работы ПУЛТ процессора положен параметрический алгоритм оценивания среднего значения, дисперсии и градиента фона в специальных окнах анализа, окружающих область вероятного появления объекта. Получены соотношения для расчета адаптивного порога при обнаружении в присутствии гауссовского шума и релеевского фона. Приводятся результаты математического моделирования по исследованию стабилизации ложных тревог, характеристики обнаружения и пример обработки изображения с нестационарным фоном. Обсуждаются основные особенности работы ПУЛТ процессора, его достоинства и недостатки.

*Ключевые слова:* оптико-электронная система (ОЭС), оценочно-компенсационная обработка, матричный фотоприемник, атмосферный фон, компенсация фона, постоянный уровень ложных тревог.

## AUTOMATIC DETECTION OF OBJECTS IN THE IMAGE IN THE PRESENCE OF A NON-STATIONARY BACKGROUND

**V.V. Kostrov, A.V.Rakitin**

*Murom Institute (branch) Vladimir State University  
named after Alexander Grigoryevich and Nikolai Grigoryevich Stoletov,  
Russian Federation, Murom, kostrov.46@mail.ru  
JSC "Submicron Research Institute",  
Russian Federation, Moscow, Zelenograd, alexey.rakitin@mail.ru*

*Annotation.* The paper considers an estimation-compensation approach to image processing to ensure a constant level of false alarm probability rate (CFAR processor) in an automatic object detection device. The operation of the CFAR processor is based on a parametric algorithm for estimating the average value, variance and gradient of the background in special analysis windows surrounding the area of the probable appearance of the object (CA-CFAR). The relations for calculating the adaptive threshold for detection in the presence of Gaussian noise and Rayleigh background are obtained. The results of mathematical modeling on the study of false alarm stabilization, detection characteristics and an example of image processing with a non-stationary background are presented. The main features of the CFAR processor, its advantages and disadvantages are discussed.

*Keywords:* optoelectronic system (OES), estimation-compensation processing, matrix photo detector, atmospheric background, background compensation, constant false alarm rate (CFAR).

## Введение

Применение технологий технического зрения и оптико-электронных систем (ОЭС) позволяет существенно повысить информативность систем наблюдения [1-3]. Поэтому интерес к этим уникальным, и в то же время – информативным средствам в последние годы заметно возрастает [1]. Среди важных народнохозяйственных задач, которые решаются с помощью ОЭС, можно выделить мониторинг земной поверхности, наблюдение тропосферы и космических объектов, мониторинг поверхностей океанов, морей и рек, гидрологический и океанографический мониторинг и т.п. В связи с ростом объема перерабатываемой информации при обработке и дешифрировании изображений все более востребованной становится автоматизированная и автоматическая обработка, которая максимально снижает субъективный фактор, вносимый оператором [2].

Одной из основных проблем, которую нужно решать в первую очередь при организации автоматического обнаружения объектов на изображениях, получаемых от оптико-электронных систем (ОЭС), является снижение влияния нестационарного фона [1,4,5]. В случае наблюдения воздушного пространства таким фоном становится излучающая атмосфера, содержащая различные облачные и другие метеообразования. Кроме таких нестационарностей, на качество изображений могут влиять искусственные и естественные источники света, которые также затрудняют анализ изображений. Постоянное изменение входных сигналов и условий функционирования ОЭС приводит к необходимости гибкой перестройки алгоритмов обработки сигналов, адаптации всей системы. Другим фактором, обостряющим проблему автоматического обнаружения объектов, является низкое отношение сигнал-шум, которое обусловлено сложной фоно-целевой обстановкой.

Будем полагать, что для получения изображений используется матричное фотоприемное устройство (МФУ), сигналы которого представляются в виде набора строк и образуют прямоугольный растр. Такой сигнал обрабатывается в специальном видеопроцессоре, причем организация процедур обработки может ограничиваться в простейшем случае пределами одной строки, в более сложных случаях – охватывать несколько строк и, наконец, наиболее полную информацию можно получить обработкой нескольких кадров [6]. К настоящему времени сложилось несколько направлений построения сигнальной обработки для снижения влияния атмосферного фона (АФ) или подстилающей поверхности. Основными являются направления, связанные с улучшением изобразительных свойств изображений и обработкой видеопотоков, получаемых с помощью ОЭС [6,7]. Применение большинства из этих методов предполагает предварительную оценку и выбор инструментов оператором, что не всегда возможно из-за малого ресурса времени, отводимого на обработку. Более приспособлены под задачи автоматического обнаружения объектов методы пространственной фильтрации с корреляционной обработкой строк и столбцов [8], однако они удовлетворительно работают при разбиении изображений на небольшие фрагменты, не содержащие более одного объекта. В работе [8] для обнаружения сигналов ОЭС с учетом фона также предлагается оценочно-компенсационный алгоритм, однако он для построения оценок требует существенной априорной информации.

*Целью данной работы* является рассмотрение принципов и алгоритмов автоматического обнаружения объектов на изображениях с постоянным уровнем ложных тревог в нестационарных условиях с общих позиций оценочно-корреляционно-компенсационного приема при использовании информации в пределах только одного кадра.

## 1. Структура ОЭС

Предполагаем, что изображение  $f(x, y)$  представляет собой смесь фонового (коррелированного)  $g(x, y)$  и широкополосного  $n(x, y)$  шумов с сигналом  $s(x, y)$  и описывается моделью [1,3]

$$f(x, y) = g_0 + \theta \cdot s(x, y) + g(x, y) + n(x, y),$$

где  $\theta$  – индикатор наличия или отсутствия сигнала,  $\theta = 0$  в случае отсутствия сигнала или  $\theta = 1$  при его наличии;  $g_0$  – постоянная составляющая, обеспечивающая положительное значение яркости. В ландшафтных сценах эта модель описывает локально-однородное поле случайных значений яркости. Статистическая неоднородность вызвана медленно меняющейся детерминированной составляющей. Поэтому при обработке таких сцен производится первоначальная сегментация с целью формирования локально-однородной в статистическом плане областей («лес», «поле», «водоем» и др.). Коррелированная помеха  $g(x, y)$  аппроксимирует атмосферный фон (АФ), а широкополосный шум  $n(x, y)$  – некоррелированную составляющую наблюдаемого сигнала (шум усилителей сигналов и матричного приемника изображений).

Функция  $s(x, y)$  изображения объекта, как и функция  $g(x, y)$  фона, является детерминированной функцией или реализацией случайного поля. Эти функции всегда имеют различные первые моменты, т.е. разные средние яркости. Поэтому переход от одной функции к другой, т.е. от фона к объекту или от объекта к фону, всегда сопровождается изменением яркости в области границы фон-объект. Задача заключается в принятии обоснованного решения о том, что входной сигнал  $f(t)$  представляет собой смесь фона, шума и полезного пикселя (импульса)  $s(t)$  (гипотеза  $H_1$ ,  $\theta = 1$ ), либо содержит только шум и фон (гипотеза  $H_0$ ,  $\theta = 0$ ).

Универсальным инструментом проверки гипотез служит отношение правдоподобия, которое в условиях поставленной задачи может быть определено оценочно-корреляционно-компенсационным методом [9]

$$\Lambda_T = \exp \left( \iint_T (\hat{s}_t + (\hat{g}_{1t} - \hat{g}_{0t})) N^{-1} (f - \hat{g}_{0t}) dx dy - \frac{1}{2} \iint_T (\hat{s}_t + (\hat{g}_{1t} - \hat{g}_{0t}))^{Tr} N^{-1} (\hat{s}_t + (\hat{g}_{1t} - \hat{g}_{0t})) dx dy \right),$$

где оценки  $\hat{s}_t, \hat{g}_{1t}$  вычисляются в предположении о наличии сигнала;

$\hat{g}_{0t}$  – оценка, вычисляемая в предположении об отсутствии сигнала;

$f(x, y)$  – наблюдаемое изображение, полученное в результате пространственной дискретизации непрерывного поля;

$T$  – область интегрирования на изображении;

$t$  – текущие координаты  $(x, y)$ ;

$N$  – спектральная плотность шума;

символ  $Tr$  означает транспонирование.

Обычно в устройствах обработки ограничиваются моделированием логарифма отношения правдоподобия

$$Z_T = \iint_T (\hat{s}_t + (\hat{g}_{1t} - \hat{g}_{0t})) (f - \hat{g}_{0t}) dx dy.$$

При этом предполагается, что апостериорные средние значения (оценки), мощность шума и фона измеряются в процессе обработки. Кроме того, в системах автоматического обнаружения оценка фона производится на участках, свободных от сигнала, поэтому  $\hat{g}_{1t} \cong \hat{g}_{0t}$ . Основной операцией вычисления  $Z_T$  в общем случае является корреляционная обработка сигналов, которая при наблюдении точечного объекта вырождается в попиксельный анализ изображения.

В МФУ осуществляется пространственная дискретизация с последующим аналого-цифровым преобразованием и формированием кадра изображения. После оцифровки получаем сигнал  $U_{ij}^{(k)}$ , который используется при последующей обработке. Здесь  $i$  – индекс вре-



мени по строке,  $i = 0, 1, 2, \dots, W$ ;  $j$  – номер строки,  $j = 0, 1, 2, \dots, H$ ;  $W \times H$  – размер изображения по ширине и высоте;  $k$  – номер кадра.

В качестве сигнала далее используется модель точечного объекта, яркость которого носит случайный характер. Вообще говоря, если сравнивать системы видимого диапазона и ИК диапазона, то можно отметить, что резкость изображения с увеличением длины волны падает, и изображение точки растекается по соседним пикселям. Поэтому реальное изображение точки получается в общем случае размытым и вокруг точки наблюдается некоторое довольно быстрое снижение яркости. Такая постановка задачи наиболее полно отвечает использованию широкоугольных ОЭС наблюдения воздушного пространства. Атмосферный фон в таких условиях представляет собой нестационарный процесс, который может иметь большие перепады яркости, например при переходе линии горизонта. Вместе с тем, АФ имеет достаточно сильную корреляцию, зависящую от структуры облачных образований [1], что может быть использовано для фильтрации и компенсации АФ.

Перед устройствами обработки изображений в ОЭС стоят сложные задачи приема случайных сигналов в условиях априорной неопределенности и наличия атмосферного фона. На первоначальном этапе необходимо решить вопрос о наличии или отсутствии целей, т.е. произвести обнаружение полезных сигналов. Данная задача является бинарной, в процессе решения которой устройство обработки изображений должно сделать выбор между двумя гипотезами: 1) присутствует только аддитивная смесь теплового шума электронных устройств ОЭС и атмосферного фона, 2) присутствует аддитивная смесь сигнала точечного объекта, теплового шума и АФ.

Обобщенная структура ОЭС с автоматическим компенсатором помех и стабилизацией уровня вероятности ложных тревог представлена на рисунке 1. По сути, компенсация фона производится с использованием оценки  $\hat{g}_{0t}$ , которая участвует при формировании порога ПУЛТ процессора. В типовой схеме (показана пунктиром) после оцифровки видеосигнал поступает на блок цифровой обработки сигналов видеопроцессора (ЦОС ВП), где осуществляется повышение контраста, определение границ, сглаживание шума, коррекция битых пикселей и др., т.е. производится обработка для улучшения визуальных свойств изображений. За результатом обработки оператор может наблюдать по ВКУ.

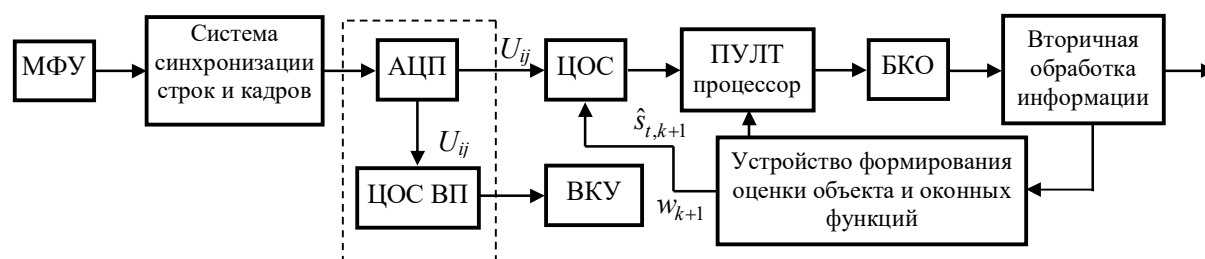


Рис. 1. Обобщенная структура ОЭС с ПУЛТ процессором

МФУ – матричное фотоприемное устройство; АЦП – аналого-цифровой преобразователь;  
 ЦОС – цифровая обработка сигналов; ПУЛТ процессор – устройство обнаружения сигналов с постоянным уровнем ложных тревог; БКО – формирователь бинарной карты обнаружений;  
 ЦОС ВП – цифровая обработка сигналов видеопроцессора; ВКУ – видеоконтрольное устройство

В блоке ЦОС проводится оценивание основных статистических характеристик изображения и оценивание локального градиента, на основании чего в ПУЛТ процессоре формируется адаптивный порог и принимается решение об обнаружении объектов. Признаки обнаружения сводятся в бинарную карту обнаружений БКО, т.е. по существу производится переход к бинаризованным изображениям, содержащим информацию только по обнаруженным объектам. На основании полученных БКО оцениваются координаты и размеры объекта (вторичная обработка информации), которые передаются дальше к исполнительным устройствам.

В данной работе ключевым звеном в технологии обработки сигналов является адаптивный процессор с постоянным уровнем ложных тревог (ПУЛТ процессор, CFAR).

## 2. ПУЛТ процессор

Алгоритмы обнаружения с постоянным уровнем ложных тревог (CFAR) широко используются при обработке изображений, получаемых с помощью ОЭС. Стабилизация вероятности ложной тревоги  $P_{fa}$  достигается адаптивным формированием порога на основании анализа пикселей, окружающих анализируемый элемент изображения. Как правило, в ОЭС используется прямоугольная система координат, поэтому чаще всего области анализа фона, шума и сигнала представляют окна квадратной формы с размерами  $w_b \times w_b$  и  $w_s \times w_s$ , разделенные защитной зоной с максимальным размером  $w_q \times w_q$  [10]. Типичный вид оконных функций представлен на рисунке 2.

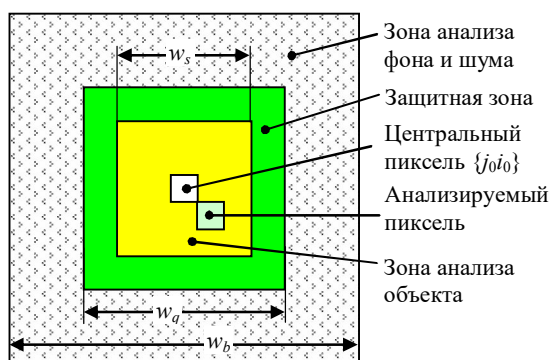


Рис. 2. Области объекта и фона для вычисления статистик

Ключевым вопросом обеспечения постоянного уровня ложных тревог является расчет адаптивного порога обнаружения, причем алгоритмы его расчета существенно зависят от функции распределения помех. Структура устройства стабилизации вероятности ложной тревоги может быть получена из следующих соображений.

При параметрическом подходе устройство стабилизации вероятности ложной тревоги в своей основе содержит адаптивные алгоритмы, которые используют параметризацию плотности распределения мешающего фона, измеряют эти параметры и подстраивают порог в соответствии с текущими значениями параметров распределения. Для решения практических задач в основном используются два параметра:  $\hat{m}_1$  и  $\hat{\sigma}^2$  – оценки математического ожидания и дисперсии.

Реальные ошибки оценивания  $\hat{m}_1$  и  $\hat{\sigma}^2$ , неконтролируемые относительно плавные изменения (градиент) фоновых помех увеличивают дисперсию процессов на входе устройства формирования порога, что приводит к дополнительным флуктуациям порога, которые эквивалентно можно отнести к входному процессу. Одним из путей повышения точности установки порога является учет нестационарных изменений фона путем измерения градиента в окне анализа. Как правило, определение статистических свойств шума и параметров градиента делается с использованием выборочного метода на основе данных ограниченного объема, полученных из каждого кадра.

В случае непараметрического подхода для формирования порога используются порядковые статистики, которые вычисляются на основе анализа содержимого области фона, не содержащей цели. К таким статистикам, не зависящим от формы распределения, относятся, например, медиана, экстремальные статистики.

Обобщенная структурная схема устройства стабилизации вероятности ложной тревоги представлена на рисунке 3, на котором приняты обозначения: ПУ – пороговое устройство;

$K_v$  – поправочные коэффициенты, зависящие от алгоритма адаптации порога;  $d_{1(ji)}$  – решение об обнаружении пикселя с целью. Такая структура реализует квазиоптимальную оценочно-компенсационную обработку сигналов и изображений.

Для простоты рассмотрения ниже используются оценки статистик, получаемые путем усреднения пикселей или квадратов значения пикселей зоны анализа фона и шума (cell average – CA-CFAR) для каждой центральной точки окна  $\{j_0i_0\}$ . Тогда математическое ожидание и второй момент определяются соотношением

$$\hat{m}_1 = N_f^{-1} \sum_{ij} U_{ij} \text{ и } \hat{m}_2 = N_f^{-1} \sum_{ij} U_{ij}^2,$$

где  $U_{ij}$  – значение поступающего пикселя,  $N_f$  – число пикселей при усреднении.



Рис. 3. Обобщенная структурная схема ПУЛТ процессора

В качестве параметров градиента используются и оцениваются два коэффициента, характеризующие градиент по горизонтали кадра  $k_{grHji}$  и по вертикали  $k_{grVji}$  области, окружающей точку  $\{j_0i_0\}$ . С учетом этих оценок вычисляется средняя мощность, которую вносит градиент во второй момент, производится по соотношению

$$P_{gr} = (k_{grH}^2 + k_{grV}^2) \cdot k_{norm},$$

где  $k_{norm}$  – нормировочный коэффициент, зависящий от объема выборки в окне анализа шума и фона. Эта мощность корректирует оценку второго момента и позволяет вычислить оценку дисперсии шума

$$\hat{\sigma}^2 = \hat{m}_2 - P_{gr} - \hat{m}_1^2.$$

Данные соотношения дают возможность сформировать порог для каждой центральной точки окна  $\{j_0i_0\}$ . В случае модели гауссовского шума и релейевских флуктуаций фона порог Неймана-Пирсона  $T_{NP}$  рассчитывается для заданной вероятности ложной тревоги  $P_{fa}$  по соотношению  $T_{NP} = \hat{m}_1 + k_{kor} \cdot h_{norm} \cdot \hat{\sigma}_n$ , где  $k_{kor}$  – корректирующий коэффициент, учитывающий объем выборки в окне анализа фона и шума;  $h_{norm} = -0,92 + \sqrt{0,847 + 5,682 \lg(P_{fa}^{-1})}$ ;  $\hat{\sigma}_n = \sqrt{\hat{\sigma}^2}$ . Соответствующие значения коэффициента  $h_{norm}$  для различных значений  $P_{fa}$  приведены в таблице 1.

Таблица 1. Значения коэффициента  $h_{norm}$

$P_{fa}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$
$h_{norm}$	3,31	3,935	4,417	4,99

Корректирующий коэффициент  $k_{kor} \rightarrow 1$  при  $N_f \rightarrow \infty$ , поэтому при предварительном

моделировании он может быть положен равным 1. Значение порога корректируется также при анализе пикселей вокруг точки  $\{j_0 i_0\}$ , которые попадают в диапазон  $(w_s \times w_s)$  зоны обнаружения целей в основном окне. На эти точки производится линейная экстраполяция среднего значения с учетом градиента

$$\hat{m}_{1gr} = \hat{m}_1 + k_{grV} \cdot \Delta_j + k_{grH} \cdot \Delta_i, \text{ где } \Delta_j, \Delta_i \in [w_s \times w_s].$$

Соответствующим образом корректируется порог в зоне анализа объекта

$$T_{NP\Delta} = \hat{m}_{1gr} + k_{kor} h_{norm} \hat{\sigma}_n.$$

Принятие решения  $d_{1(ji)}$  об обнаружении объекта в точке  $\{j, i\}$  с помощью окна с центром  $\{j_0 i_0\}$  производится путем сравнения текущего уровня яркости с адаптивным порогом  $T_{NP\Delta}$ , который вычисляется по оценкам дисперсии и среднего значения с учетом градиента вокруг анализируемой области

$$d_{ji} = \begin{cases} 1 & \text{если } U_{ji} \geq T_{NP\Delta}, \\ 0 & \text{если } U_{ji} < T_{NP\Delta}. \end{cases}$$

Результаты принятия решений записываются в бинарную карту обнаружений БКО, при этом также фиксируется частота принятых решений, которая учитывается в процессоре вторичной обработки.

### 3. Экспериментальные результаты

Для экспериментальных исследований использовалось окно с параметрами  $w_s = 7$ ,  $w_d = 11$ ,  $w_b = 21$ . Таким образом, общее количество точек в окне анализа фона и шума составило  $N_f = 320$  пикселей. О качестве стабилизации вероятности ложной тревоги можно судить по рис.унку 4, на котором представлена зависимость  $P_{fa}$  от отношения фон-шум  $q_{bn}$  для трех номинальных значений  $P_{fa} = 10^{-2}; 10^{-3}; 10^{-4}$ . Из этих графиков видно, что ПУЛТ процессор удерживает  $P_{fa} \approx \text{const}$  в широком диапазоне изменения мощности фона и шума. На рисунке 5 приведены характеристики обнаружения для различных значений  $P_{fa}$  ( $q_{sn}$  – отношение сигнал-шум, фон стационарный).

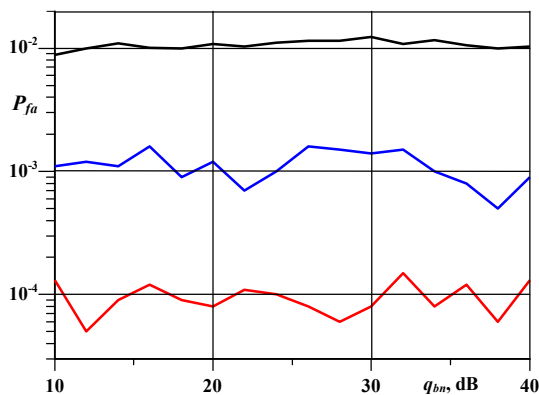


Рис. 4. Зависимость вероятности ложной тревоги от отношения фон-шум

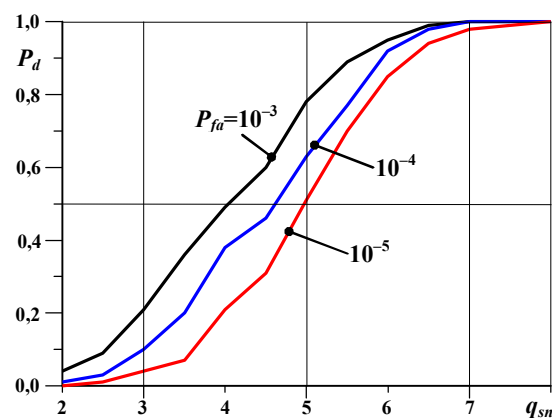


Рис. 5. Характеристики обнаружения при отношении фон-шум 10 дБ

В качестве примера применения ПУЛТ процессора к обработке изображения рассмотрен модельный случай, когда на изображении содержится 3 объекта, у которых отдельные

части имеют различную яркость. Модель такой ситуации без фона и шумов представлена на рисунке 6, а при наличии неоднородного фона и шума – на рисунке 7. Фон имеет линейный переход в пределах 40 пикселей от низкого уровня к высокому и изменение яркости в пределах кадра по гауссовскому закону. Отношение фон-шум составляет примерно 10 дБ в левой части изображения и 27 дБ – в правой, отношение сигнал-шум – около 20 дБ. Размер изображения составляет  $280 \times 200$  пикселей. Результат использования типового ПУЛТ процессора с усреднением данных в окне анализа дает БКО, которая приведена на рисунке 8. Чтобы избежать ложных обнаружений, ПУЛТ процессор настраивался на довольно высокое значение вероятности ложной тревоги  $P_{fa} = 10^{-6}$ . Бинарная карта обнаружений показывает, что объекты, расположенные на относительно однородных фрагментах изображения, уверенно обнаруживаются. Объект, попавший на границу изменения яркости, не обнаружен. Данный объект появляется при использовании ПУЛТ процессора с оценкой градиента (рис. 9).

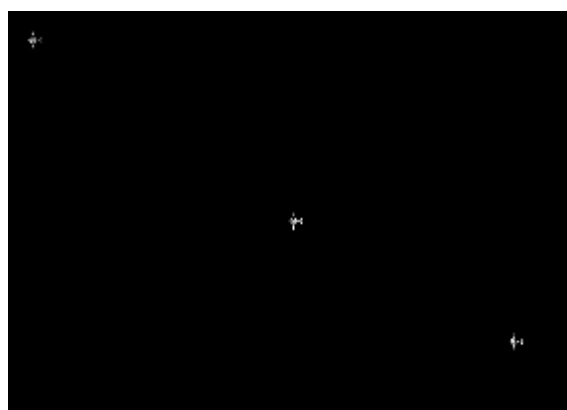


Рис. 6. Исходная модель объектов со случайными флуктуациями

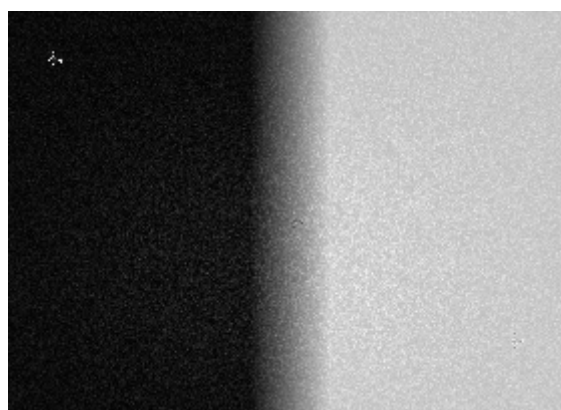


Рис. 7. Изображение на ВКУ фоноцелевой обстановки

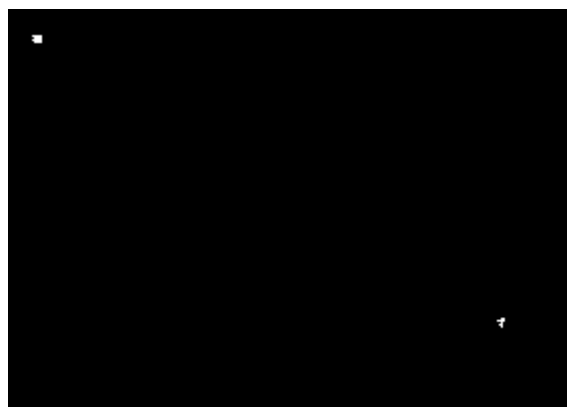


Рис. 8. Карта обнаружения сигналов с использованием типовой CA-CFAR

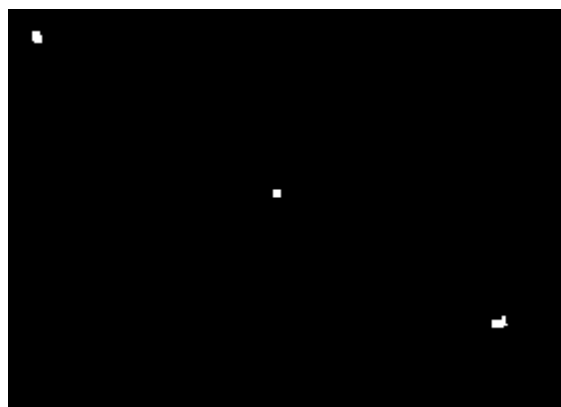


Рис. 9. Обнаружение сигналов с использованием CA-CFAR и оценки градиента

### Заключение

Проведенный анализ различных подходов к обработке изображений, получаемых с помощью ОЭС и содержащих объекты в виде точечных целей, выявил ряд особенностей автоматизации процедур обнаружения.

1) При использовании для решения задачи оптимального обнаружения классического подхода на основе логарифма отношения правдоподобия алгоритм обработки наблюдаемого изображения сводится к оценочно-компенсационной обработке. В связи с большой априорной неопределенностью обработка получается сложной в вычислительном отношении из-за большого числа одновременно оцениваемых как информационных, так и неинформа-

ционных параметров, т.к. в исходной задаче возникает много неопределенностей относительно самого объекта, зоны интегрирования сигналов и параметров фона.

2) Технология построения ПУЛТ процессора позволяет реализовать с относительно малыми потерями квазиоптимальную оценочно-корреляционно-компенсационную обработку и автоматизировать процедуру обнаружения сигналов на изображениях.

3) Применение оценки градиента фона позволяет в ПУЛТ процессоре более точно установить порог обнаружения, с одной стороны, за счет учета изменения мощности фона в пределах окна анализа фона и шума, с другой стороны, снижения ошибок в оценке среднего значения фона в пределах окна анализа сигнала. Это снижает пороговое отношение сигнал-шум и улучшает качество обнаружения объектов с малой яркостью в условиях воздействия нестационарного шума.

4) Для повышения качества обработки необходимо учитывать масштаб объекта на изображении, его ориентацию, а также геометрические параметры съемки (ракурс, угол видения, разрешающую способность и т.п.). В «Устройстве формирования оценки объекта и оконных функций» (рис. 1) по результатам обработки вырабатывается прогноз на следующий кадр и регулируются размеры оконных функций  $\{w_{k+1}\}$  и эталона объекта  $\hat{s}_{t,k+1}$ . Эта стадия нормализации изображений также потребует дополнительных вычислительных затрат, причем результаты оптимизации времени вычислений будут зависеть от применяемого алгоритмического, программного и аппаратного обеспечения.

### Библиографический список

1. Катулев А.Н., Храмичев А.А., Ягольников С.В. Цифровая обработка 2D слабоконтрастных изображений, формируемых оптико-электронным прибором в сложных фоновых условиях. Обнаружение, распознавание, сопровождение динамических объектов. – М.: Радиотехника, 2018. – 408 с.
2. Системы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление / Б.А. Алпатов, П.В. Бабаян, О.Е. Балашов, А.И. Степашкин. – М.: Радиотехника, 2008. – 176 с.
3. Совмещение изображений в корреляционно-экстремальных навигационных системах / Под ред. Л.Н. Костяшкина, М.Б. Никифорова. – М.: Радиотехника, 2015. – 208 с.
4. Костров В.В., Ракитин А.В. Корреляционно-экстремальный алгоритм поиска объектов со стабилизацией вероятности ложной тревоги // Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России: XIV Всероссийские научные Зворыкинские чтения / Сборник тезисов докладов всероссийской научной конференции (4 февраля 2022 г., Муром). – Муром, ИПЦ МИ ВлГУ. 2022. С.206-208.
5. Костров В.В., Ракитин А.В. Компенсация нестационарного фона при автоматическом поиске объектов // VI Международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании. Радиотехника и Электроника» (СТНО-2023) (1 – 3 марта 2023 г., Рязань). Том 1. – Рязань: РГРТУ, 2023. – С.72-78.
6. Мареев А.В., Орлов А.А., Рыжкова М.Н. Методы локализации объектов в видеопотоке // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2021. Вып.3. С.48-60.
7. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В.А. Сойфера. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 784 с.
8. Обнаружение и координатометрия оптико-электронных средств, оценка параметров их сигналов / Под ред. Ю.Л. Козирацкого. – М.: Радиотехника, 2015. – 456 с.
9. Сосулин Ю.Г., Костров В.В., Паршин Ю.Н. Оценочно-корреляционная обработка сигналов и компенсация помех. – М.: Радиотехника, 2014. – 632 с.
10. Rakitin A.V., Zhiganov S.N. The comparative analysis of false alarms stabilization algorithms while processing images // Proc. of 8-th Int. conf. "Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies" (PRIA-8-2007). Vol. 1. – Yoshkar-Ola: MSTU, 2007. – Pp.170-173.

УДК 620.178.5

## РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ МОДЕЛИ НЕЛИНЕЙНОГО ОБЪЕКТА ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВИБРОИСПЫТАНИЯМИ

Т.И. Молчанова\*, А.М. Никитин\*\*

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, \*tatyana.molchanova.2002@mail.ru, \*\*amn\_2020@mail.ru

*Аннотация.* В среде Simulink/Matlab разработана модель объекта виброиспытаний, в котором проявляется нелинейная упругая деформация с жесткой упругой силой. На основе анализа частотных свойств данной модели приведены рекомендации по организации управления нелинейным объектом.

*Ключевые слова:* виброиспытания, модель, нелинейный объект, управление.

## DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF A NONLINEAR OBJECT MODEL FOR COMPUTER SIMULATION OF AN AUTOMATED VIBRATION TEST CONTROL SYSTEM

T.I. Molchanova\*, A.M. Nikitin\*\*

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, \*tatyana.molchanova.2002@mail.ru, \*\*amn\_2020@mail.ru

*The summary.* In the Simulink/Matlab environment, a model of a vibration test object has been developed, in which nonlinear elastic deformation with a rigid elastic force is manifested. Based on the analysis of the frequency properties of this model, recommendations are given for organizing the control of a nonlinear object.

*Key words:* vibration tests, model, nonlinear object, control.

Автоматизированные системы управления виброиспытаниями (АСУВ) предназначены для воспроизведения заданного вибрационного состояния различных технических объектов с помощью специальных стендов. Использование таких систем позволяет существенно сократить сроки и стоимость проектирования новой техники, повысить ее надежность.

В работе [1] предложен способ организации цифровой АСУВ, предназначенной для испытаний изделий на широкополосную случайную вибрацию в диапазоне частот до 5 кГц. Структурная схема АСУВ представлена на рисунке 1,

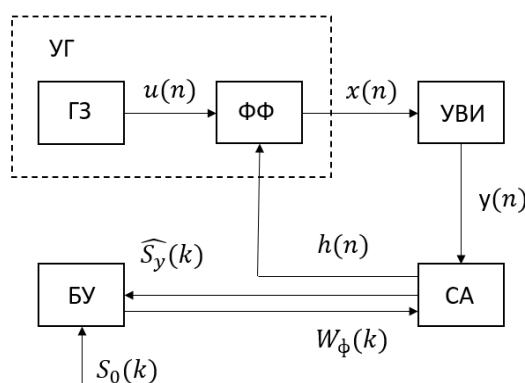


Рис. 1. Структурная схема АСУВ: ГЗ – генератор знака с равномерной спектральной плотностью в требуемом диапазоне частот; ФФ – формирующий фильтр с регулируемой формой амплитудно-частотной характеристики (АЧХ); УВИ – тракт усилитель - вибростенд – изделие; СА – анализатор спектра; БУ – блок управления.

Цель управления процессом виброиспытаний заключается в настройке управляемого генератора случайного процесса (УГ) на режим близости спектральных плотностей в кон-

тролируемой точке объекта  $\hat{S}_y(k)$  и заданной спектральной плотности  $S_0(k)$  в требуемом диапазоне частот  $\omega_k$  в плане принятого критерия качества и поддержания этого режима в течение определенного интервала времени.

Формирующий фильтр реализован в классе цифровых фильтров с конечной памятью и осуществляет операцию линейной свертки весовой функции  $h(n)$  с входной равновероятной знаковой последовательностью  $u(n)$ ,  $u(n) \in \{-1, 1\}$ :

$$x(n) = \sum_{m=0}^{N-1} h(m)u(n-m), \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

Анализатор спектра вычисляет оценку амплитудного спектра выходного сигнала тракта УВИ в соответствии с методом модифицированных периодограмм [2] следующим образом. Последовательность  $y(n)$  разбивается на  $r$  не перекрывающихся подпоследовательностей  $y_r(n)$ ,  $r = 1, 2, \dots, R$  длиной по  $N$  отчетов. Для каждой из подпоследовательностей  $y_r(n)$  рассчитываются коэффициенты Фурье  $Y_r(k)$  по формуле:

$$Y_r(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y_r(n) e^{-j(\frac{2\pi}{N})nk}, \quad k = \overline{0, N-1}. \quad (2)$$

Оценка спектральной плотности амплитуд находится следующим образом:

$$\hat{S}_y(k) = \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R |Y_r(k)|, \quad k = \overline{0, N/2}. \quad (3)$$

Блок управления на основе сопоставления спектральных плотностей  $\hat{S}_y(k)$  и  $S_0(k)$  вырабатывает новые значения АЧХ ФФ по следующему эффективному в вычислительном отношении итеративному алгоритму:

$$W_\phi^{(i)}(k) = W_\phi^{(i-1)}(k) + \gamma_i [S_0(k) - \hat{S}_y^{(i)}(k)] W_\phi^{(i-1)}(k) / \hat{S}_y^{(i)}(k), \quad k = \overline{0, N/2}, \quad (4)$$

где  $i$  – номер итерации,

$\gamma_i = 1/i$  – коэффициенты, обеспечивающие сходимость.

Точность достижения заданного вибрационного состояния оценивается следующими показателями:

$$\overline{E} = \frac{1}{N1} \sum_{k=0}^{N1-1} \left| \frac{S_0(k) - \hat{S}_y(k)}{\overline{S}_0} \right| \cdot 100\%, \quad (5)$$

$$\overline{E}^2 = \frac{1}{N1} \sum_{k=0}^{N1-1} \left[ \frac{S_0(k) - \hat{S}_y(k)}{\overline{S}_0} \right]^2 \cdot 100\%, \quad (6)$$

$$\overline{S}_0 = \frac{1}{N1} \sum_{k=0}^{N1-1} S_0(k),$$

где  $N1$  – число отчетов спектральной плотности, приходящихся на заданный частотный диапазон.

Алгоритм управления (4) разработан и исследован для случая, когда тракт УВИ рассматривается как линейная динамическая система, при отсутствии нелинейных эффектов. Результаты моделирования показали, что в этом случае погрешность воспроизведения за-



данной спектральной плотности порядка 3÷5% по выражениям (5) и (6) достигается уже после первой итерации алгоритма управления.

Однако в большинстве реальных объектов почти всегда проявляются нелинейные свойства. Эти свойства присущи также другим элементам тракта УВИ (усилителю и вибростенду), но наиболее заметно они проявляются в испытуемом изделии. В сложных механических изделиях нелинейные свойства, обусловленные такими явлениями, как люфт, упор, нелинейные упругие деформации, существенно обогащают спектр выходного сигнала. В результате это приводит к необходимости разработки специальных алгоритмов управления такими объектами.

В настоящей работе приводятся результаты моделирования объекта, в котором проявляется одна из наиболее часто встречающихся на практике нелинейностей – нелинейная упругая деформация с жесткой восстанавливающей силой. Полученные результаты дают возможность осуществить идентификацию данной нелинейности в процессе проведения виброиспытаний, а также организовать управление таким объектом.

Элементы механических конструкций такие как корпуса электронных блоков, панели, пластины описываются нелинейным дифференциальным уравнением второго порядка следующего вида [3]:

$$\ddot{y} + f_1(\dot{y}) + f_2(y) = kx(t), \quad (7)$$

где  $f_1(\dot{y})$  - нелинейный коэффициент демпфирования,  $f_2(y)$  - нелинейная упругая (восстанавливающая) сила. Уравнение (7) можно привести к иному виду, если в правую и левую части добавить слагаемые вида  $2\xi\omega_0\dot{y}$  и  $\omega_0^2 y$

$$\ddot{y} + 2\xi\omega_0\dot{y} + \omega_0^2 y = kx(t) - (f_1(\dot{y}) - 2\xi\omega_0\dot{y}) - (f_2(y) - \omega_0^2 y). \quad (8)$$

Обозначив  $f_1(\dot{y}) - 2\xi\omega_0\dot{y} = \phi_1(\dot{y})$ ,  $f_2(y) - \omega_0^2 y = \phi_2(y)$  и вводя символ дифференцирования  $D=d/dt$ , приходим к уравнению:

$$(D^2 + 2\xi\omega_0 D + \omega_0^2)y(t) = kx(t) - \phi_1(Dy) - \phi_2(y). \quad (9)$$

Если в уравнении (9) положить  $\phi_1(Dy) = 0$ ,  $\phi_2(y) = 0$ ,  $k = k_0\omega_0^2$  и с учетом соотношения  $1/\omega_0 = T_0$  приходим к известному уравнению линейного колебательного звена:

$$(T_0^2 D^2 + 2\xi T_0 D + 1)y(t) = k_0 x(t). \quad (10)$$

Искомое дифференциальное уравнение для нелинейности типа жесткая упругая сила ( $\phi_1(Dy) = 0, \phi_2(y) = y^3$ ) имеет следующий вид:

$$\ddot{y}(t) + 2\xi\omega_0 \dot{y}(t) + \omega_0^2 y(t) = k_0\omega_0^2 x(t) - y^3(t). \quad (11)$$

Обозначив  $y = y_1$ , запишем уравнение (11) в форме Коши:

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = y_2, \\ \dot{y}_2 = k_0\omega_0^2 x - 2\xi\omega_0 y_2 - \omega_0^2 y_1 - y_1^3. \end{cases} \quad (12)$$

Моделирование данной нелинейности было проведено в пакете Simulink системы Matlab. При этом саму нелинейность можно реализовать двумя способами. В первом способе реализуется выражение (11) с помощью блоков библиотеки Simulink, как показано на рисунке 2.

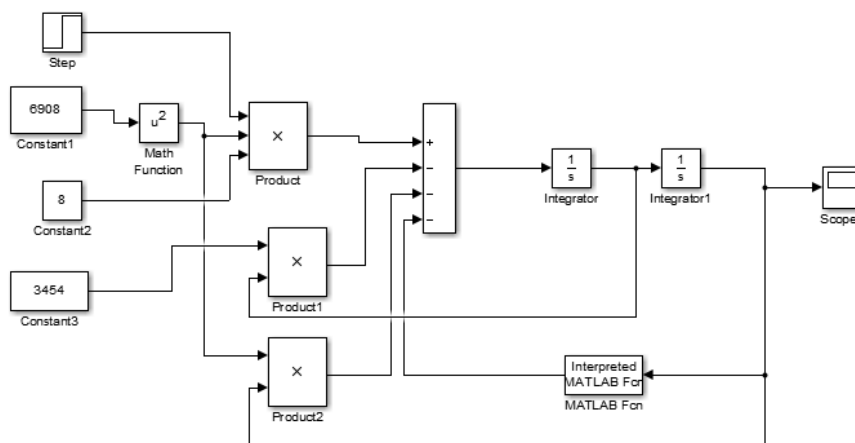


Рис. 2. Реализация нелинейного объекта с помощью блоков библиотеки Simulink

Здесь установлены следующие численные значения параметров нелинейного объекта:

$$k_0 = 8; \omega_0 = 2\pi f_0 = 2\pi * 1100 = 6908 \frac{rad}{c}, \xi = 0,25.$$

При втором способе решения уравнения (11) используется специальный редактор дифференциальных уравнений DEE, в котором необходимо записать дифференциальное уравнение в форме Коши. Открытое окно редактора DEE для моделирования уравнений (12) с теми же значениями параметров представлено на рисунке 3.

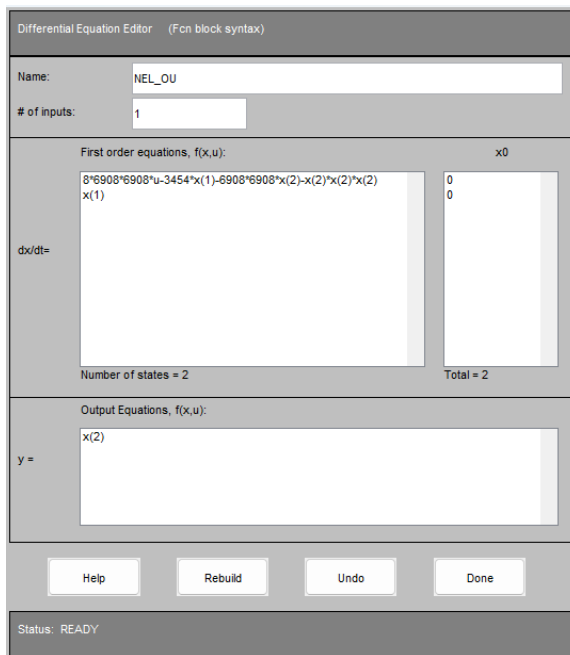


Рис. 3. Редактор дифференциальных уравнений

В данном редакторе принято входную величину обозначать символом *u*, а выходную – символом *x*.

Наиболее интересные результаты были получены при моделировании рассматриваемой нелинейности в частотной области. Схема модели для исследования частотных свойств нелинейного объекта представлена на рисунке 4.

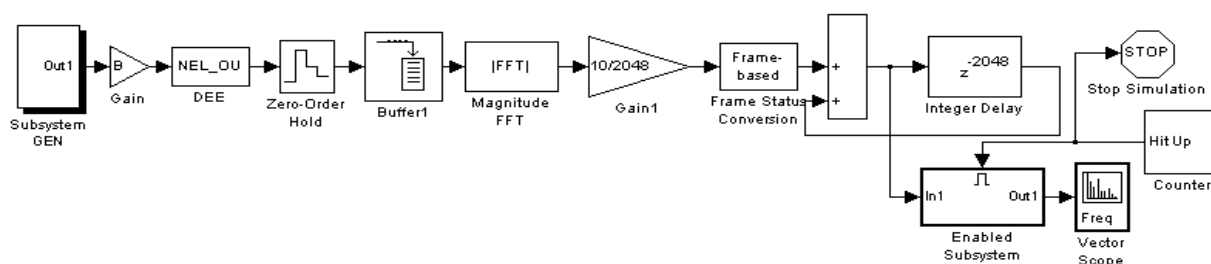


Рис. 4. Схема модели для исследования частотных свойств нелинейного объекта

На вход нелинейного объекта, представленного блоком DEE, коммутируется сигнал типа белого шума с генератора знака (Subsystem GEN), построенного в соответствии с образующим полиномом  $\phi(z) = z^{25} + z^3 + 1$ . Интенсивность шума регулируется с помощью коэффициента  $B$  в блоке Gain. С помощью оставшихся блоков реализуется спектральный анализ выходного сигнала нелинейного объекта. В модели частота квантования составляет 20 кГц при размере кадра БПФ  $N=2048$  отчетов.

Результаты моделирования для некоторых значений  $B$  представлены на рисунке 5, а,б,в,г.

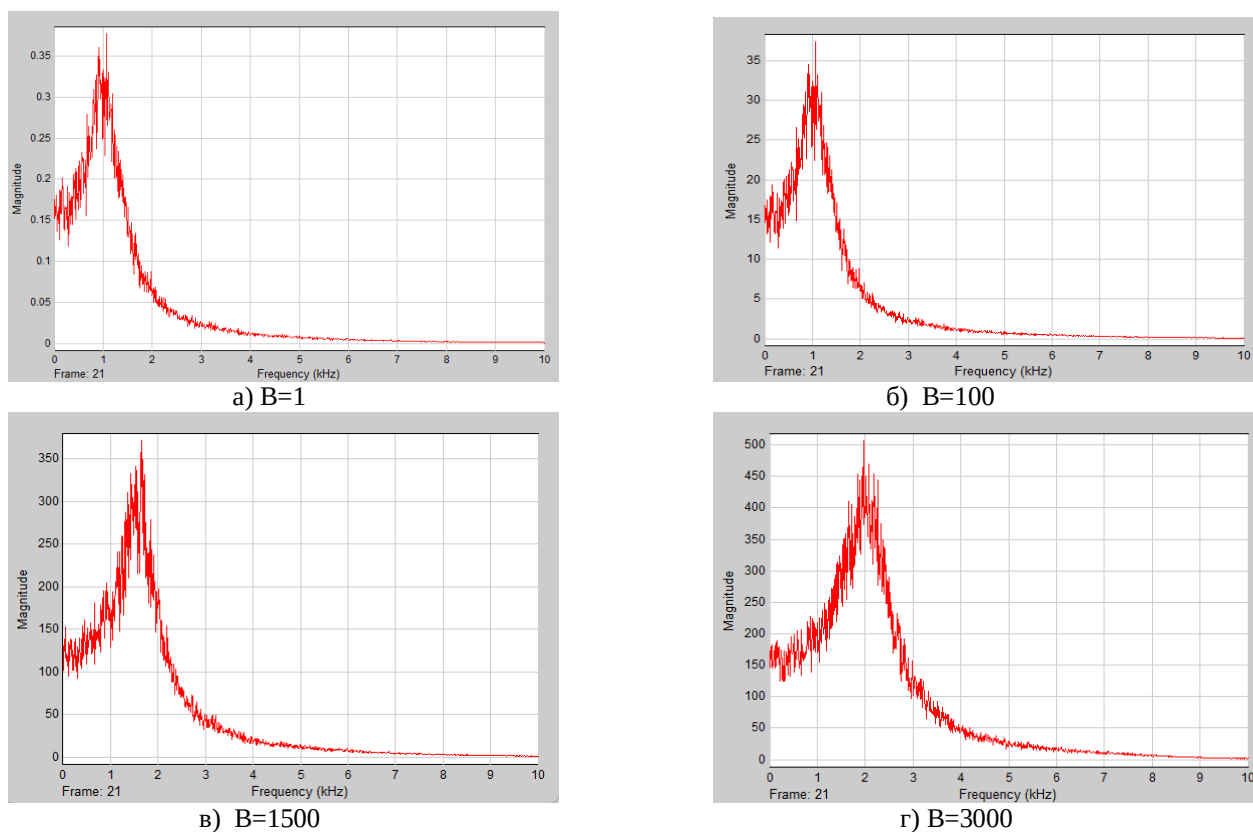


Рис. 5. Результаты моделирования при различных коэффициентах  $B$

Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод о том, что при увеличении интенсивности входного сигнала резонансный пик смещается в область верхних частот с одновременным нелинейным увеличением его амплитуды. Это отражено на графиках на рисунке 6. Данную информацию можно использовать для организации управления таким объектом.

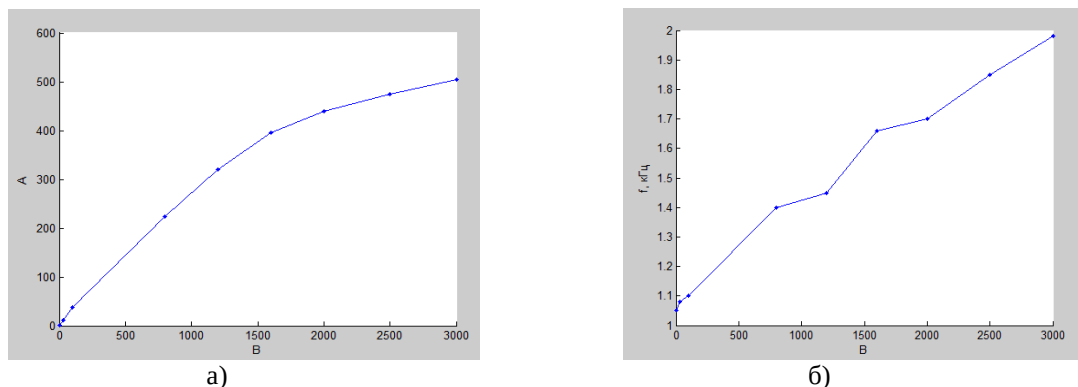


Рис. 6. а) Зависимость амплитуды резонансного пика от коэффициента  $B$ ,  
б) Зависимость частоты резонансного пика от коэффициента  $B$

Результаты моделирования позволяют сделать следующие выводы. Если при выходе на режим нагружения (при увеличении мощности возбуждающего сигнала вибростенда) наблюдается существенное отличие заданного и фактического спектров в контролируемой точке объекта, можно предположить, что в объекте проявляются нелинейные свойства. На следующих итерациях алгоритма управления (4) мощность возбуждающего сигнала существенно не меняется, а, следовательно, слабо меняется спектр выходного сигнала объекта управления. Это обстоятельство делает возможным использовать алгоритм (4) для организации управления нелинейным объектом. Поскольку величина поправки к АЧХ формирующего фильтра в алгоритме (4) определяется коэффициентом  $\gamma_i$ , то необходимо соответствующее управление этим коэффициентом. Дальнейшие исследования будут направлены на модернизацию алгоритма управления (4) с целью получения удовлетворительных результатов воспроизведения заданного спектра для нелинейного объекта.

#### Библиографический список

1. Демашов В.С., Кузнецов В.П., Никитин А.М. Автоматизированная система управления виброиспытаниями // Приборы и системы управления. 1993. №9. с.28-31.
2. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. – М.: Мир, 1978.
3. Лурье А.И. Нелинейная теория упругости. - М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980.

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ТЕПЛОВИЗИОННОГО ПОИСКА УТЕЧЕК НА ТЕПЛОСЕТЯХ

**К.О. Выставкин**

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, vistavkin94@mail.ru*

*Аннотация.* В данной работе рассматривается возможность создания системы поиска утечек на теплосетях для осуществления активного контроля состояния теплотрасс.

*Ключевые слова:* комплекс тепловизионный; анализ; разработка; изображение; аэрофото- снимки; интерфейс; программное обеспечение; обработка; ТЕРМСОФТ; matlab; сборка.

## AUTOMATED SYSTEM FOR THERMAL IMAGING DETECTION OF LEAKS ON HEATING NETWORKS

**K.O. Vistavkin**

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, vistavkin94@mail.ru*

*Annotation.* This paper examines the possibility of creating a system for detecting leaks in heating networks to carry out active monitoring of the condition of heating mains.

*Keywords:* complex, thermal imaging, analysis, development, image, aerial photographs, interface, software, treatment, THERMSOFT, matlab, assembly.

Целью данной работы является автоматизация и оптимизация процесса обнаружения утечек на теплотрассах, а также уменьшение количества теряемого теплоносителя за счет своевременного и точного анализа состояния теплосетей при помощи аппаратно-программного комплекса обработки тепловизионных цифровых изображений [1, 2].

Разрабатываемый продукт представляет собой комплекс, включающий в себя:

- Дрон-квадрокоптер, оснащённый тепловизионным модулем для получения изображения теплосетей в инфракрасном спектре;
- Записывающее устройство, которое будет передавать изображения с тепловизионного модуля на внешний носитель;
- Программное обеспечение для обработки полученных снимков с целью выявления потенциальных утечек;

Задачи: разработать алгоритм обнаружения утечек на тепловых аэрофотоснимках. Обеспечить работу базовой версии программы по анализу тепловых изображений. Создать интерфейс для полноценной работы с полученными снимками. Спроектировать конструкцию дрона. Подобрать необходимые комплектующие для сборки беспилотного летательного аппарата. Собрать и протестировать систему.

За основу для разработки алгоритма обнаружения утечек был взят пакет прикладных программ Matlab, как один из популярнейших инструментов для инженерных вычислений.

Пусть в качестве основы дано изображение, представленное на рисунке 1.

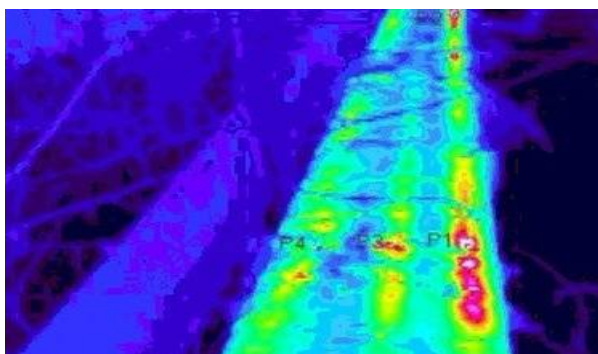


Рис. 1. Исходное изображение

В среде Matlab RGB-изображение имеет представление в виде трехмерного массива размера  $M*N*3$ , где  $M$  – число строк изображения,  $N$  – число столбцов. Для дальнейшей обработки необходимо оставить только  $B$  – канал (рис. 2). Далее перейдем от полутонового изображения к бинарном с определением порогового значения опытным путем (рис. 3).

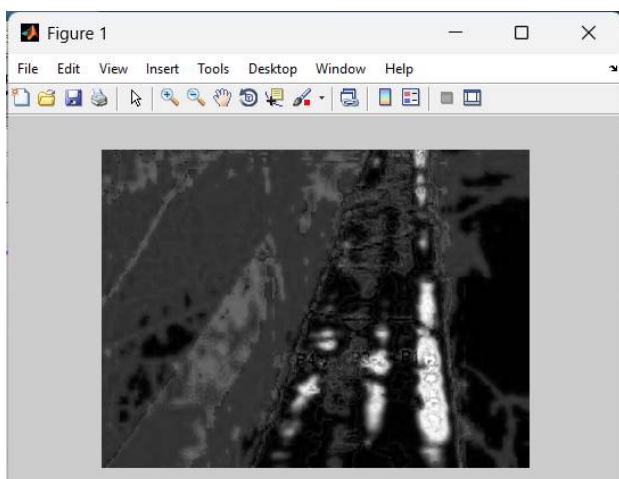


Рис. 2. Исходное изображение без R- и G-цветовых каналов

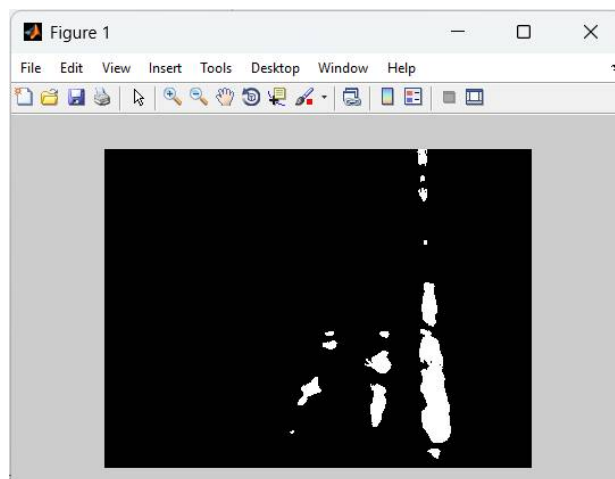


Рис. 3. Бинарное изображение

С помощью внутренних функций пакета Image Processing Toolbox среды Matlab находим информацию о каждом сегменте (белых областях изображения) – периметр каждого сегмента и координаты его центра. Экспериментальным путем находим оптимальное значение периметра, больше которого область считается обширной, что сигнализирует об утечке на теплотрассе. После выделяем данные области красной рамкой (рис. 4).

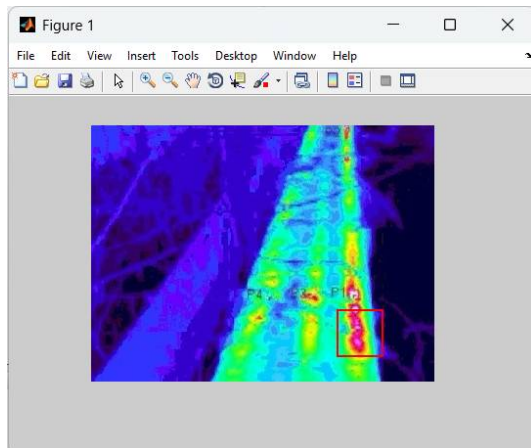


Рис. 4. Результат работы алгоритма

Для корректной работы системы тепловизионного поиска утечек на теплосетях важно правильно подобрать комплектующие. Квадрокоптер должен обеспечивать стабильный полет, иметь надежные системы навигации, достаточное разрешение камеры для обнаружения дефектов теплосетей и удобное управление.

В процессе подбора рамы квадрокоптера была выбрана модель MARK4 7 FR-367, она сделана из карбона, что обеспечивает большую прочность, а также малый вес конструкции (рис. 5). Бесколлекторные моторы Avenger 2806.5 1300 кВ были выбраны, так как отличаются высокой мощностью, моторы долговечны и практически не создают шума, что особенно важно для полетов в режиме FPV.



Рис. 5. Рама и моторы в сборке

В качестве полётного контроллера была выбрана модель Speedybee F7 V3, так как она оснащена мощным процессором и имеет интуитивно понятный интерфейс, а также множество встроенных функций, которые упрощают процесс настройки и калибровки квадрокоптера.

Также, для съемки теплотрасс будет использоваться модель тепловизионного неохлаждаемого модуля MICRO IIS 384/640, характеристики которого приведены на рисунке 6. Модуль обладает высоким разрешением и относительно невысокой ценой.

Модуль	Microl11384	Microl11640
Тип датчика	неохлаждаемый инфракрасный датчик с матрицей в фокальной плоскости из оксида ванадия (Vox)	
Разрешение	384×288	640×512
Шаг пикселя	12мкм	
Частота смены кадров	50Гц/30Гц <sup>(1)</sup>	
Спектр реагирования	8 ~ 14мкм	
Тепловая чувствительность	≤50мк@25°C, F#1.0 (≤40мк, опционально)	
Термальный охладитель	Нет	

Рис. 6. Характеристики тепловизионного модуля

Следующий этап сборки модели заключался в установке на раму полетного контроллера и присоединении к нему моторов посредством пайки, разъёма для аккумулятора, а также распределителя питания к полётному контроллеру при помощи шины (рис. 7, 8).

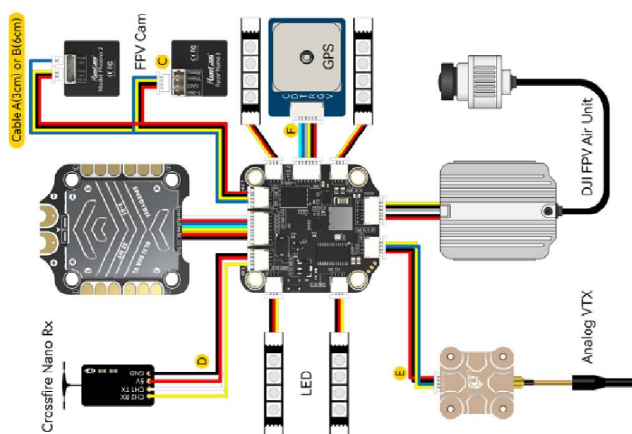


Рис. 7. Схема подключения устройств к контроллеру



Рис. 8. Макет собранной конструкции

В рамках выполнения работ по разработке автоматизированной системы тепловизионного поиска утечек на теплосетях, был проведен подбор комплектующих, осуществлена сборка макета, а также выбран базовый алгоритм обработки изображений. Далее планируется доработка макета дрона и программы для обработки снимков, а также проведения испытаний с уже готовой системой.

### Библиографический список

1. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений: пер. с англ. / Р. Гонсалес, Р. Вудс. Под ред. П.А. Чочиа. М.: Техносфера, 2008. 1072 с.
2. Алгоритмизация обработки тепловизионного изображения мобильного объекта в системе слежения / С.Е. Ашанин, В.Н. Федотов, А.В. Федотов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2016. - №3(39). – С. 93-104.



УДК 004.627; ГРНТИ 50.05.03

## КОРРЕКЦИЯ ЗОННЫХ ИСКАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОСЕТИ U-NET

Н.А. Соколов

Рязанский государственный университет радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, daen.g@yandex.ru

*Аннотация.* В работе рассматривается проблема зонных искажений на спутниковых изображениях, вызванных неравномерностью освещения и чувствительности сканирующего устройства. Обучающая выборка формируется путем искусственной генерации зонных искажений на изображениях с заданными параметрами. Рассматривается архитектура нейронной сети U-Net, сравнительная характеристика параметров обучения, приводятся результаты экспериментов. В заключении рассматривается программа восстановления искаженных изображений с различными обученными моделями сети U-Net.

*Ключевые слова:* зонные искажения, формирование зонных искажений, U-Net.

## CORRECTION OF ZONE RESTORATIONS USING THE U-NET NEURAL NETWORK

N.A. Sokolov

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, daen.g@yandex.ru

*Annotation.* The paper examines the problem of zone distortions in satellite images caused by uneven illumination and sensitivity of the scanning device. The training sample is formed by artificially generating zone distortions in images with specified parameters. The architecture of the U-Net neural network, comparative characteristics of training parameters are considered, and the results of experiments are presented. In conclusion, a program for restoring distorted images with various trained U-Net network models is considered.

*Keywords:* Zone distortions, Formation of zone distortions, U-Net.

Часто при дистанционном зондировании Земли на аэрокосмических снимках возникает яркостное искажение сюжета, когда яркость плавно перетекает с одного края снимка к другому. Такие искажения обычно называются зонными. Они заключаются в появлении на снимках плавных яркостных переходов в следствии изменений угла освещения Солнцем поверхности Земли или в следствии неравномерной чувствительности фотоприемных элементов сканирующего устройства. Целью проведенного исследования является попытка удаления с космических снимков зонных искажений с помощью нейронной сети U-Net [1].

Для решения поставленной задачи необходимо сначала разработать алгоритм, который искусственно формирует зонные искажения на изображениях с заданными параметрами. Зонные искажения вносятся в видеоданные либо путем вычисления добавки по аналитически заданному выражению, либо с использованием яркостной маски.

Рассмотрим сначала способ формирования яркостных искажений с помощью аналитически заданного выражения. В алгоритме генерации искажений задаются следующие параметры: с какой стороны начнется градиент (слева или справа), ширину градиента, т.е., насколько далеко он будет распространяться от края изображения и увеличение или уменьшение яркости в направлении градиента.

Пусть:

- $b_{\text{new}}[i]$  – новое (искаженное) значение яркости элементов  $i$ -го столбца;
- $b[i]$  – исходное значение яркости элементов столбца с номером  $i$ ;
- $G$  – ширина градиента, заданная пользователем;
- 255 – максимальное значение яркости (белый цвет);
- $N$  – ширина изображения;
- $M$  – высота изображения.

Искаженное изображение может формироваться 4-мя способами.

Способ 1. Зонное искажение слева и увеличение градиента в направлении градиента:



$$b_{new}[i] = \frac{b[i] \cdot 255}{G}$$

Способ 2. Зонное искажение слева и уменьшение градиента в направлении градиента:

$$b_{new}[i] = \frac{(G - b[i] - 1) \cdot 255}{G}$$

Способ 3. Зонное искажение справа и увеличение градиента в направлении градиента:

$$b_{new}[i] = \frac{(b[i] - (N - G)) \cdot 255}{G}$$

Способ 4. Зонное искажение справа и уменьшение градиента в направлении градиента:

$$b_{new}[i] = \frac{((N - G) - b[i] - 1) \cdot 255}{G}$$

Пример генерации зонного искажения по второму способу представлено на рисунке 1.



Рис. 1. Зонное искажение (слева) и исходное изображение (справа)

Рассмотрим формирование яркостных искажений с помощью наложения яркостной маски. Яркостная маска представляет собой изображение с заданными уровнями яркости, которое поэлементно накладывается на исходный снимок. Маска генерируется с заданной шириной и равномерно распределенным изменением яркости пикселей. Полученное таким образом зонное искажение аналогично формированию искажений с помощью аналитически заданного выражения, только не требует затрат на вычисления.

Программная реализация генерации зонных искажений обеспечивает:

- формирование пары снимков: с искажениями и без них;
- возможность выбора высоты и ширины формируемых изображений;
- выбор вида искажений или их полное отсутствие;
- возможность задавать параметры искажений, такие как размах ширины яркостного градиента, возможные направления искажений, размахи начала и окончания значений яркости сформированного искажения;

Программа формирования обучающего и тестового набора данных разработана на языке Python. Она запускается с использованием облачных технологий GoogleColab. Полученный набор данных сохраняется на GoogleDrive, что обеспечивает доступность и удобство при работе с обучающей выборкой, резервное копирование данных и возможность совместной работы.

Следующим шагом является выбор нейронной сети, задача которой - это восстановление искаженных снимков. В результате проведенного сравнительного анализа между раз-

личными архитектурами нейронных сетей для задачи восстановления изображений (CNN, ResNet, Generative Adversarial Networks (GANs)) была выбрана модель U-Net. Нейронная сеть U-Net обладает рядом преимуществ в задаче восстановления изображений, такими как малое количество данных для обучения, способность к восстановлению деталей и быстрое действие модели как на стадии обучения, так и на стадии использования натренированной модели.

Рассмотрим архитектуру нейронной сети более подробно [2]. U-Net является одной из основных архитектур сверточных нейронных сетей для задач сегментации изображений, где требуется не только определить общий класс изображения, но и выделить отдельные области по классам, создавая маску, которая разделяет изображение на различные части. Это свойство используется в задаче восстановления изображений. Архитектура U-Net состоит из пути, который уменьшает размерность для захвата контекста, а затем из симметричного пути, который увеличивает размерность и позволяет точно локализовать объекты на изображении. Для U-Net характерно достижение высоких результатов в различных реальных задачах, в частности биомедицинских приложений и использование небольшого количества данных для достижения хороших результатов. Расширенная архитектура U-Net приведена на рис. 2. U-Net состоит из двух основных частей: сужающегося пути слева и расширяющегося пути справа. Сужающийся путь представляет собой типичную архитектуру сверточной нейронной сети, где последовательно применяются две операции свертки размером  $3 \times 3$ , затем выполняется функция активации ReLU, и после этого применяется операция максимального объединения размером  $2 \times 2$  для уменьшения размерности.

На каждом этапе уменьшения размерности количество каналов признаков удваивается. Каждый шаг в расширяющемся пути начинается с операции увеличения размерности карты признаков, за которой следует свертка  $2 \times 2$ , уменьшающая количество каналов признаков, и объединение с соответствующей обрезанной картой признаков из сужающегося пути. Затем к полученным данным применяются две операции свертки размером  $3 \times 3$ , за которыми следует функция активации ReLU.

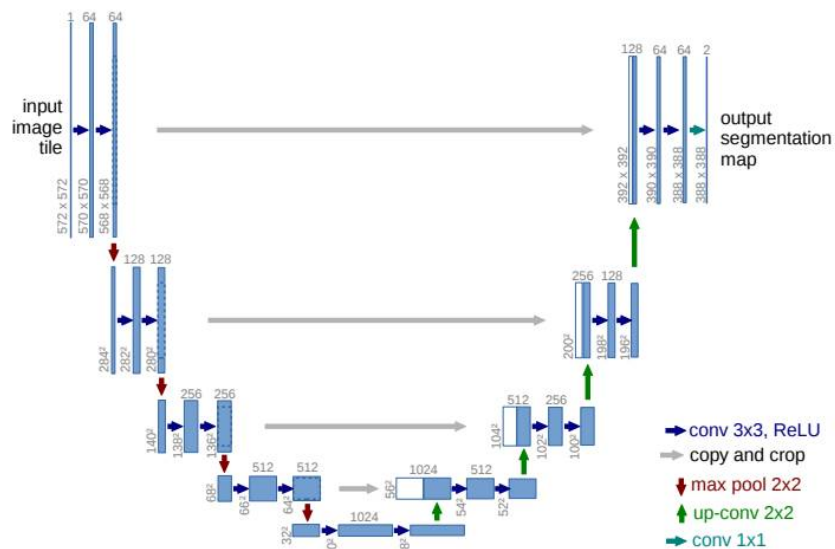


Рис. 2. Архитектура U-Net

Сеть обучается методом стохастического градиентного спуска с использованием выборки искаженных и исходных снимков. По сформированным наборам данных (каждое изображение размером 128x128 пикселей), проводились эксперименты по обучению U-Net с различными параметрами, которые представлены в таблице 1. Результаты эксперимента 1 представлены на рисунке 3. Результаты эксперимента 6 представлены на рисунке 4.

Таблица 1. Параметры экспериментов обучения Unet

№ эксперимента	Размер набора данных	Количество эпох обучения	Размер батча (выборки с диска)	Ошибка обучения	Метрика
1	1000	5	32	categorical cross-entropy	MSE
2	1000	30	32	categorical cross-entropy	MSE
3	3000	30	128	MSE	SSIM
4	3000	30	128	MSE	SSIM
5	3000	100	128	MSE	SSIM
6	3000	100	128	SSIM	MSE

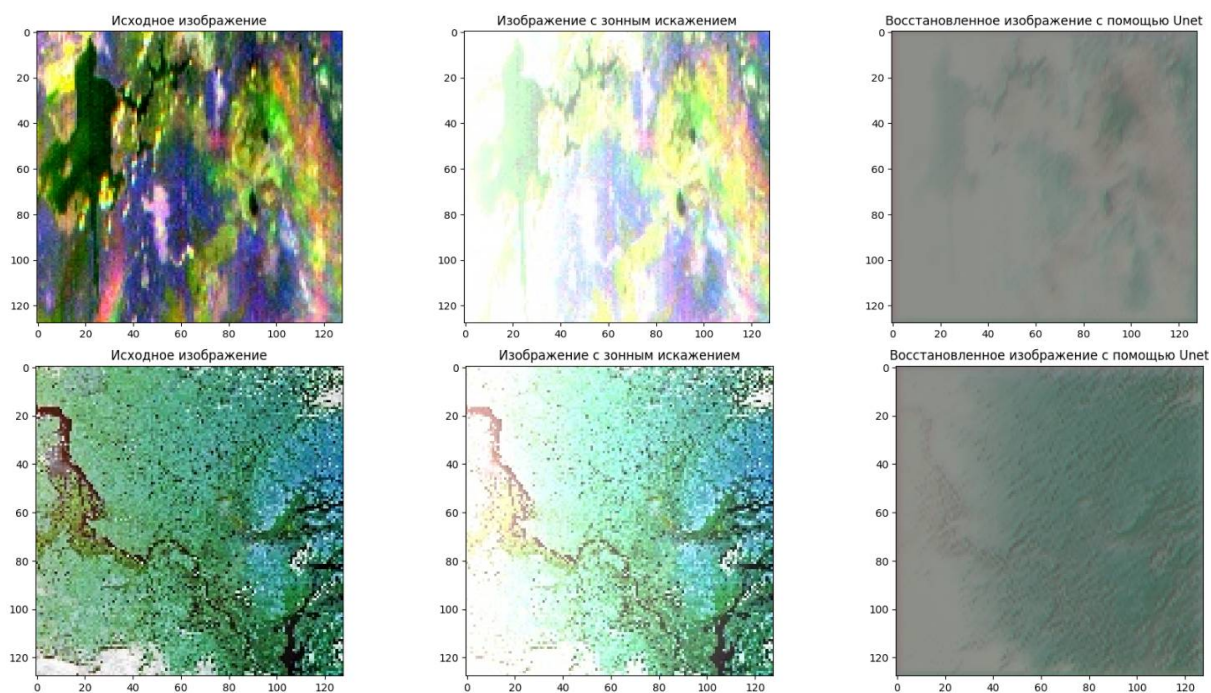


Рис. 3. Эксперимент 1

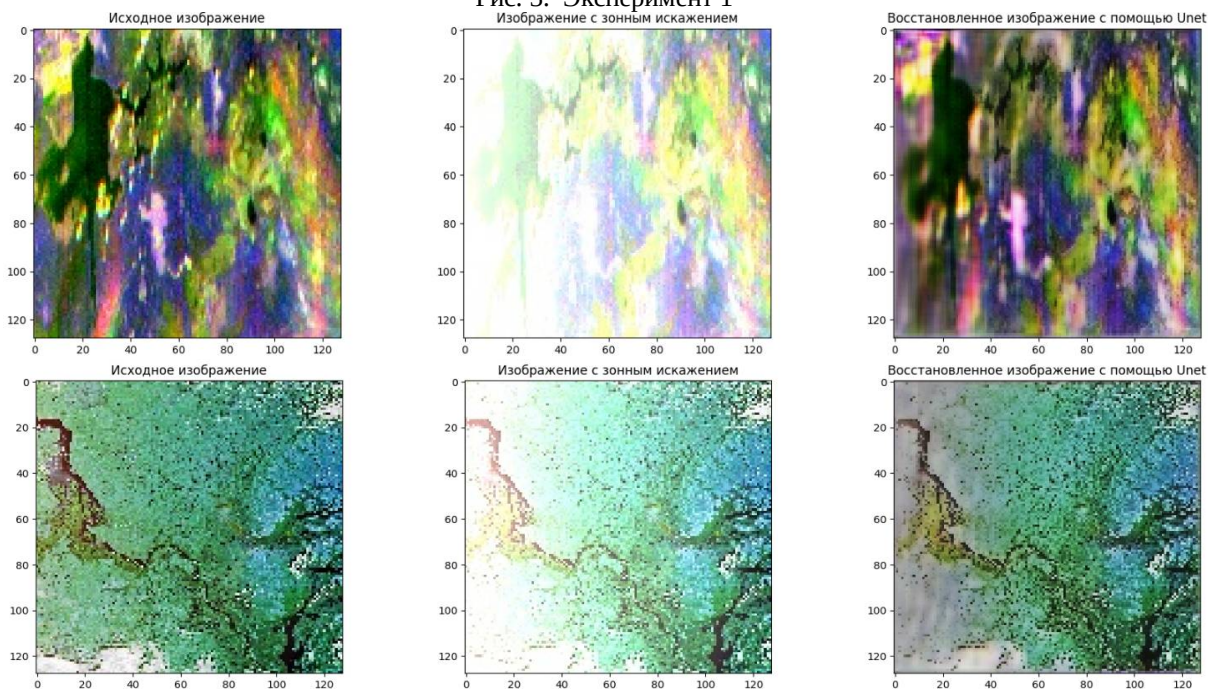


Рис. 4. Эксперимент 6



В таблице 1 номера экспериментов приведены в порядке возрастания результатов обработки зонных искажений.

Как видно из рисунков 3 и 4 нейронная сеть в целом справляется с поставленной задачей, но при этом появляются искажения цветопередачи исходных снимков. В ходе проведения ряда экспериментов удалось эмпирическим путем подобрать параметры нейросети, обеспечивающие максимальное качество коррекции зонных искажений без добавления новых. Для интерактивного взаимодействия пользователя с обученными моделями была разработана программа с графическим интерфейсом. С ее помощью можно загрузить изображение с зонным искажением, выбрать необходимую модель и получить восстановленный снимок. На рисунке 5 представлен пример работы программы.

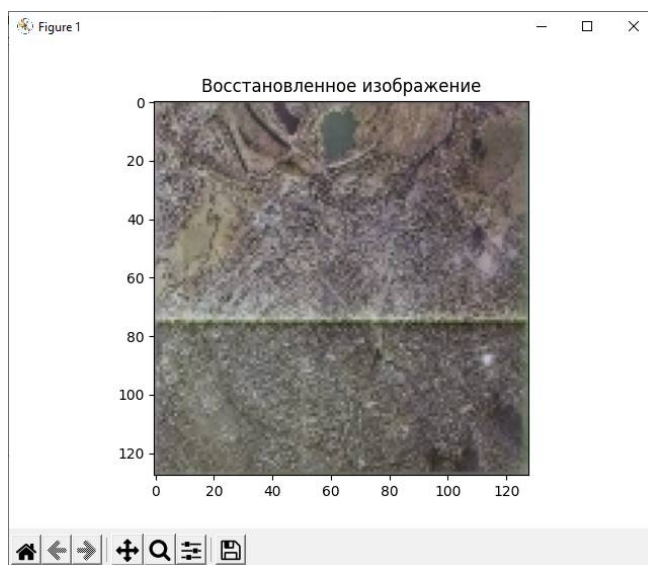


Рис. 5. Пример коррекции зонных искажений

*Работа выполнена по научным руководством д.т.н. А.Э. Москвитина*

### **Библиографический список**

1. O. Ronneberger, P.Fischer, and T. Brox, "U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation," in Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention (MICCAI), ser. LNCS, vol. 9351. Springer, 2015, pp. 234–241.
2. U-Net: нейросеть для сегментации изображений - Neurohive URL: <https://neurohive.io/> (дата обращения: 26.02.2024).

УДК 004.089; ГРНТИ 50.49

## **ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПРОГНОЗА СПРОСА В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ ПОТРЕБИТЕЛЬСКОГО РЫНКА**

**В.Л. Бурковский, Е.А. Сердечная**

*Воронежский государственный технический университет,  
Российская федерация, Воронеж, serdechnaya.evgeniya@yandex.ru*

*Аннотация.* В данной работе рассматривается проблематика анализа и прогнозирования мониторинговых данных в рамках организационных систем потребительского рынка для повышения эффективности принимаемых управленческих решений. Рассмотрены вопросы интеграции мониторинговых данных в систему поддержки принятия решений, а также ключевые моменты в области применения машинного обучения для анализа мониторинговых данных.

*Ключевые слова:* машинное обучение, мониторинг данных, поддержка принятия решений.

## APPLICATION OF NEURAL NETWORK TECHNOLOGIES FOR FORECASTING DEMAND IN ORGANIZATIONAL SYSTEMS OF THE CONSUMER MARKET

V.L. Burkovsky, E.A. Serdechnaya

Voronezh State Technical University,

Russian Federation, Voronezh, serdechnaya.evgeniya@yandex.ru

*Abstract.* This paper examines the problems of analysis and forecasting of monitoring data within the organizational systems of the consumer market to improve the effectiveness of management decisions. The issues of integrating monitoring data into a decision support system are considered, as well as key points in the field of machine learning for monitoring data analysis.

*Keywords:* machine learning, data monitoring, decision support.

В настоящее время совершенствование информационных технологий на потребительском рынке вызывает широкий интерес, поскольку способствует увеличению спроса среди покупателей.

Внедрение современных методов мониторинга данных позволяет проводить анализ и поиск оптимальных решений для различных задач, что особенно актуально в условиях растущего рынка.

Нейронные сети могут анализировать большие объемы данных и обнаруживать сложные закономерности в потребительском поведении, что позволяет более точно прогнозировать спрос на различные товары и услуги. Так, открываются возможности обработки исторических данных о продажах, макроэкономических показателях, социальных тенденциях. На основе этих данных нейронные сети могут создавать прогнозы спроса, которые помогут компаниям более эффективно управлять запасами, разрабатывать маркетинговые стратегии и принимать другие стратегические решения. Таким образом, прогнозирование потребностей с помощью нейронных сетей решает многие ресурсозатратные задачи, такие как экономия времени, удовлетворение этих потребностей, продвижение непопулярных товаров.

### **Возможные проблемы применения машинного обучения для анализа мониторинговых данных**

Несмотря на весомые преимущества процесса интеллектуальных технологий стоит отметить, что прогнозирование спроса с использованием машинного обучения требует хорошо подготовленных данных, а также тщательного анализа и интерпретации результатов [1]. Также необходимо учитывать факторы, влияющие на спрос, которые может быть сложно учесть в моделях нейронных сетей.

Применение нейро-нечётких подходов для прогнозирования потребительского спроса на рынке может столкнуться с некоторыми ограничениями, такими как, недостаток данных. Для эффективной работы нейронных сетей требуется большое количество данных. В случае прогнозирования потребительского спроса, может быть сложно собрать достаточное количество разнообразных данных, особенно если дело касается новых товаров или услуг. В некоторой степени это касается и вариативности потребительского поведения: потребительский спрос может быть подвержен влиянию различных факторов, включая экономическую ситуацию, маркетинговые кампании, сезонные колебания и т.д. Нейросетевые модели могут испытывать трудности в учете всех этих факторов.

### **Альтернативные методы повышения эффективности принятия управленческих решений на основе мониторинговых данных**

Помимо недостатка данных стоит отметить недостаточную интерпретируемость. Нейросетевые модели могут быть сложными и трудными для интерпретации, что может затруднить понимание того, какие факторы оказывают влияние на спрос [2]. Ввиду этого возникает

потребность обучения: для построения точной модели прогнозирования потребительского спроса необходимо провести обучение нейросетевой модели на исторических данных, что может потребовать значительных усилий и ресурсов.

Для компенсации выше перечисленных недостатков, а также для повышения эффективности принятия управленческих решений на основе мониторинговых данных можно определить следующие подходы:

1. Анализ данных: важно проводить глубокий анализ мониторинговых данных с использованием статистических методов и моделей, чтобы выявить скрытые тенденции, связи и причинно-следственные связи.

Перечислим основные методы анализа данных:

- **Дескриптивный анализ данных:** это метод анализа, который используется для описания основных характеристик данных, таких как среднее значение, медиана, стандартное отклонение и т.д.
- **Инференциальный анализ данных:** это метод анализа, который используется для выводов и обобщений на основе выборочных данных.
- **Регрессионный анализ:** это метод анализа, который используется для изучения отношений между зависимыми и независимыми переменными.
- **Кластерный анализ:** это метод анализа, который используется для разделения данных на группы или кластеры на основе их сходства.
- **Временной ряд:** это метод анализа, который используется для изучения изменений в данных с течением времени.

2. Визуализация данных: Использование графиков, диаграмм и других визуальных инструментов поможет лучше понять данные и выявить важные паттерны. Она позволяет быстро и наглядно анализировать данные, выявлять тенденции, аномалии и важные показатели. Визуализация также помогает оперативно принимать решения на основе данных мониторинга.

Для визуализации мониторинговых данных часто используются специализированные инструменты, такие как графические дашборды, бизнес-аналитические программы, инструменты бизнес-интеллекта и мониторинга производительности. Такие инструменты позволяют создавать графики, диаграммы, отчеты и дашборды, которые облегчают восприятие и анализ мониторинговых данных.

Эффективная визуализация данных может помочь выявить проблемы, предсказать отказы и увидеть возможности для улучшения эффективности системы или процесса. Она также облегчает коммуникацию между участниками процесса мониторинга и управления, делая информацию более понятной и доступной.

3. Использование информационных технологий: Применение специализированного программного обеспечения и технологий для сбора, хранения и анализа мониторинговых данных поможет автоматизировать процесс принятия решений. Для сбора большого числа данных необходима надежная и масштабируемая инфраструктура, способная обрабатывать и хранить большие объемы информации. Это может включать в себя использование высокопроизводительных серверов, баз данных со способностью горизонтального масштабирования, а также механизмы автоматизации для сбора и обработки данных. Также важно обеспечить безопасность и защиту данных от потери или несанкционированного доступа.

4. Постановка конкретных целей: Определение четких целей и критериев для оценки эффективности данных поможет улучшить процесс принятия решений. Определение четких целей и критериев для оценки эффективности данных играет важную роль в улучшении процесса принятия решений. Четкие цели помогают определить, что именно мы хотим достичь, а критерии оценки эффективности данных позволяют измерить, насколько успешно мы это сделали.

Установление четких целей позволяет определить желаемый результат и направление усилий. Цели должны быть конкретными, измеримыми, достижимыми и ограниченными по времени. Это помогает уточнить, какие данные нам нужны и какие параметры мы будем использовать для оценки их эффективности.

Критерии для оценки эффективности данных указывают, как мы будем измерять достижение поставленных целей. Они определяют, какие показатели будут использоваться для оценки данных и какие результаты будут считаться успешными. Основные критерии могут включать такие параметры, как точность данных, их своевременность, надежность и релевантность для принятия решений.

Учитывая эти факторы, определение четких целей и критериев для оценки эффективности данных помогает обеспечить, что наши решения будут поддержаны соответствующей информацией и будут основаны на ясных и измеримых целях.

5. Актуализация данных: Важно обновлять и проверять мониторинговые данные, чтобы убедиться, что они соответствуют реальной ситуации.

6. Принятие несмещенных решений: Имея точные мониторинговые данные, управленческие решения могут быть приняты без субъективности и предубеждений.

### **Система поддержки принятия решений**

Таким образом, при наличии данных и методов их управления возникает потребность в интеграции их в систему поддержки принятия решений.

Система поддержки принятия решений на основе нейросетевых интерпретируемых алгоритмов анализа мониторинговых данных - это специализированная система, которая использует методы и технологии нейросетей для анализа мониторинговых данных и предоставляет интерпретируемые результаты, которые могут помочь принимать решения. Такая система сможет использовать свои алгоритмы для выявления паттернов или трендов в мониторинговых данных и предоставлять информацию, которая помогает принимать важные решения. Она решает ряд проблем, связанных с обработкой и интерпретацией больших объемов данных. Это может включать в себя выявление аномалий, прогнозирование тенденций, оптимизацию процессов и принятие решений на основе данных [3].

Структурная организация системы поддержки принятия решений включает в себя компоненты, обеспечивающие сбор, анализ и обработку информации, а также предоставление рекомендаций или альтернативных вариантов действий, кроме того, использовать информационные технологии, методы и модели анализа данных, а также определенные процессы и процедуры, направленные на обеспечение эффективного принятия решений с учетом имеющейся информации.

Такая система может использоваться в различных областях, таких как финансы, здравоохранение, производство и техническое обслуживание, чтобы помочь в принятии информированных и эффективных решений на основе сложных данных и мониторинговых показателей.

Исходя из всего вышесказанного, актуальность применения нейросетевых технологий для прогнозирования потребительского спроса обусловлена необходимостью улучшения точности прогнозов в условиях динамичного рыночного окружения. Нейронные сети предоставляют возможность проведения более сложного анализа большого объема данных, что способствует улучшению прогностических моделей и более точному прогнозированию потребительского спроса. Кроме того, нейросетевые технологии позволяют учесть нелинейные зависимости и неоднородность данных, что делает их эффективным инструментом для моделирования и анализа потребительского поведения. Таким образом, использование нейросетевых технологий в прогнозировании потребительского спроса может значительно улучшить

качество и точность прогнозу озов, что является важным элементом для успешного управления предприятием в условиях рыночной конкуренции.

Кроме того, использование искусственного интеллекта в маркетинге может помочь компаниям создавать инновационные и уникальные продукты и услуги, подстраивая их под потребности рынка. Такие подходы способствуют увеличению конкурентоспособности компаний и привлекают больше внимания со стороны потребителей.

Таким образом, использование искусственного интеллекта в потребительском рынке может способствовать более точному прогнозированию спроса, созданию уникальных продуктов и персонализированных предложений, что в итоге может привести к увеличению спроса на товары и услуги компаний.

### Библиографический список

1. Dong, Guozhu, and Huan Liu, eds. Feature engineering for machine learning and data analytics. CRC Press, 2018
2. Moskaleva, O. Creating Test Data for Market Surveillance Systems with Embedded Machine Learning Algorithms / O. Moskaleva, A. Gromova // Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS. – 2017. – Vol. 29, No. 4. – P. 269-282.
- 3 Зинченко, М. А. Интеллектуальная информационная система поддержки принятия решений на основе нейросетевых технологий в процессе организации закупок / М. А. Зинченко, Н. Д. Навалихина // Вопросы устойчивого развития общества. – 2022. – № 4. – С. 1445-1455

УДК 681.518.25

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ GPGPU-ВЫЧИСЛЕНИЙ ДЛЯ СОКРАЩЕНИЯ ВРЕМЕНИ НЕОБХОДИМОГО НА ОБУЧЕНИЕ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Д.Н. Карпухин, В.Л. Бурковский, Д.С. Шевченко

*Воронежский государственный технический университет,  
Российская Федерация, Воронеж, karpuxin.1996@mail.ru*

*Аннотация.* В данной статье анализируется потенциал использования GPGPU-вычислений для ускорения обработки телеметрических данных. С учетом стремительного развития технологий вычислений, особое внимание уделяется выявлению преимуществ и ограничений данного подхода в контексте анализа данных.

*Ключевые слова:* параллельные вычисления, искусственные нейронные сети.

## USING GPGPU COMPUTING TO REDUCE THE TIME REQUIRED TO TRAIN AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

D.N. Karpukhin, V.L. Burkovsky, D.S. Shevchenko

*Voronezh State Technical University, Voronezh,  
Russian Federation, karpuxin.1996@mail.ru*

*The summary.* This article analyzes the potential of using GPGPU computing to accelerate the processing of telemetry data. Given the rapid development of computing technologies, special attention is paid to identifying the advantages and limitations of this approach in the context of data analysis.

*Keywords:* parallel computing, artificial neural networks.

В настоящее время искусственные нейронные сети (ИНС) стали незаменимым инструментом в анализе данных [1, 2]. В сфере электроснабжения расширение возможностей автоматизации и телемеханизации привело к значительному увеличению собираемой информации. Это открывает широкие возможности для использования ИНС, обучающихся на массивных данных в режиме реального времени. Современные вычислительные комплексы значительно ускоряют процесс обработки данных и обучения нейросетей. В этом контексте раз-



работка систем, поддерживающих GPGPU-вычисления (массово-параллельные вычисления на графических процессорах) [3], является наиболее эффективным решением.

Автономные объекты энергопитания (АОЭ) являются источниками обширных данных о потреблении электроэнергии и работе различных систем [4]. Благодаря вычислениям на графических процессорах (GPU) эти данные обрабатываются параллельно, существенно ускоряя обучение ИНС. Это обусловлено тем, что в каждом слое нейросети нейроны не имеют прямых связей между собой, что позволяет вычислять выходные сигналы всех нейронов в данном слое одновременно.

Процесс обработки данных на АОЭ схематично изображен на рисунке 1.

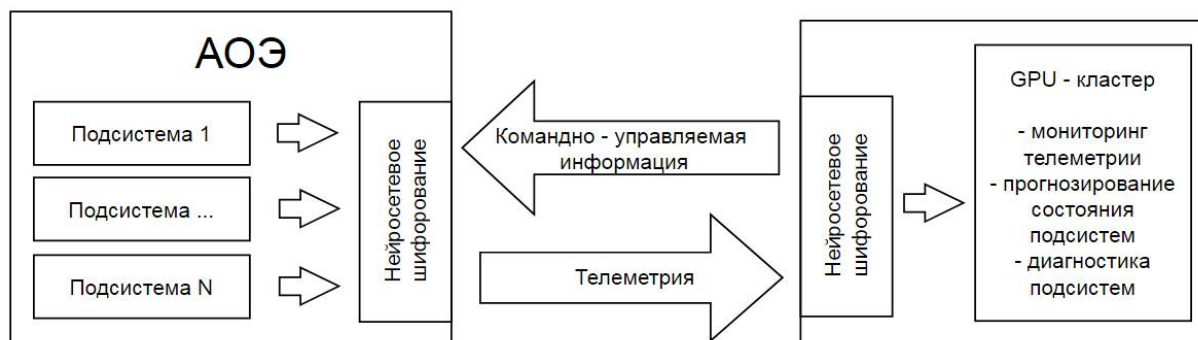


Рис. 1. Процесс обработки данных

В качестве иллюстрации преимуществ использования GPU в работе с нейронными сетями было разработано приложение, которое позволяет обучать и проводить вычисления с ИНС. Интерфейс тестового приложения представлен на рисунке 2.

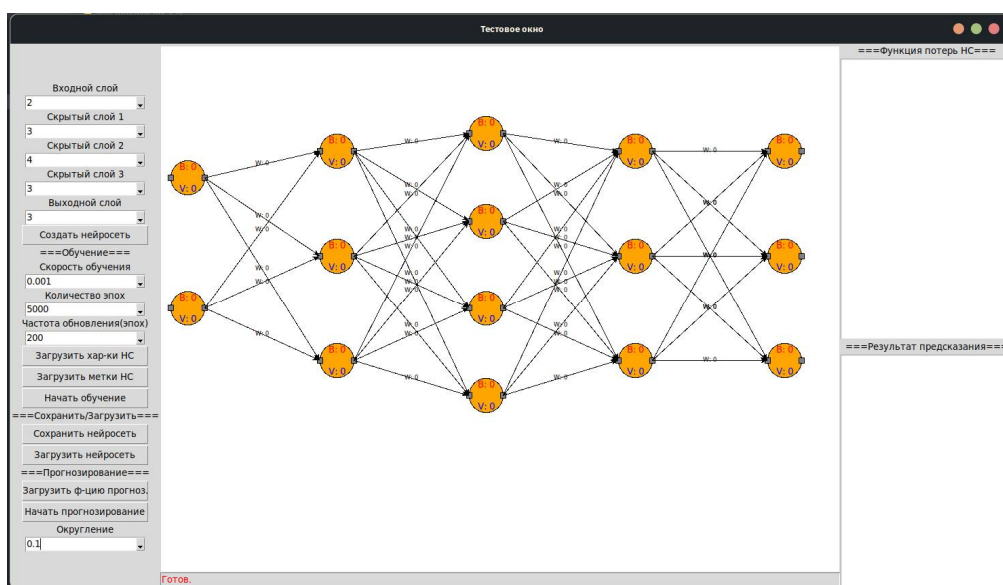


Рис. 2. Окно тестового приложения

Для повышения производительности, приложение использует интеллектуальный механизм управления передачей данных между оперативной и видеопамятью, оптимизируя обмен данными. Во время обучения нейронной сети хост-приложение эффективно управляет очередью задач, выполняемых на GPU, обеспечивая непрерывный процесс без задержек. Отслеживание прогресса обучения осуществляется путем периодической проверки среднеквадратичной погрешности, которая сравнивается с заданным пороговым значением. Это позво-

ляет определить момент завершения обучения. Чтобы избежать перерывов в исполнении, проверка погрешности не выполняется на каждой итерации, что гарантирует бесперебойную работу очереди команд. Кроме того, программа включает ряд дополнительных функций, повышающих удобство использования и эффективность. Пользователь имеет возможность настраивать различные параметры нейронной сети, чтобы достичь оптимальных результатов. Он может выбрать количество входных и выходных узлов, определить количество скрытых слоев и количество нейронов в каждом слое. Это позволяет более гибко настраивать архитектуру сети под свои потребности. В приложении предусмотрена возможность выбора алгоритма обучения (метод обратного распространения ошибки, метод градиентного спуска, метод сопряженных градиентов), который будет использоваться для тренировки нейронной сети. Каждый из этих алгоритмов имеет свои преимущества и недостатки, и выбор зависит от конкретной задачи и требований пользователя. Благодаря поддержке многопоточности на CPU и GPU программа обладает высокой гибкостью и эффективностью, а также имеет возможность загрузки исходных данных для обучения.

Алгоритм обучения ИНС включает в себя несколько этапов:

1. Настройка архитектуры нейронной сети, подготовка обучающих данных и выбор оптимального метода обучения с соответствующими параметрами.

2. Обучающие данные переносятся на видеокарту для дальнейшей обработки, что ускоряет процесс обучения.

3. Вычисления на видеокарте:

3.1. Выполняется прямой расчёт значений выходных нейронов ИНС на основе входных данных.

3.2. Для каждой связи между нейронами вычисляется градиент с использованием сопряженного графа.

3.3. Веса связей между нейронами корректируются в соответствии с градиентом и параметрами обучения.

3.4. Вычисляется среднеквадратичная ошибка.

3.5. Параметры обучения корректируются в соответствии с выбранным методом обучения.

Центральный процессор управляет последовательностью выполнения команд, не вмешиваясь в сами вычисления, которые полностью выполняются на видеокарте, что обеспечивает оптимальную скорость обучения. Для повышения эффективности использования графического процессора была проведена оптимизация алгоритма. Один из подходов заключался в использовании совместно используемых потоков. Совместное использование потоков позволяет нескольким потокам совместно использовать буфер памяти, что снижает накладные расходы на передачу данных и повышает производительность. Другим подходом была оптимизация алгоритма расчета градиента. Градиент является важным элементом обучения нейронной сети, поскольку он указывает направление, в котором необходимо двигаться для минимизации функции потерь. Путем оптимизации вычисления градиента удалось снизить количество операций и, следовательно, повысить производительность.

Для оценки производительности программы проведены ряд тестов. Основным критерием эффективности стало среднее время изменения веса одной межнейронной связи, которое вычисляется по следующей формуле:

$$t = TN / W, \quad (1)$$

где  $t$  – среднее время модификации одного веса;

$T$  – общее время обучения;

$N$  – количество итераций обучения;

$W$  – общее количество весов нейронной сети.

Исследование показало, что по мере увеличения размера нейронной сети среднее время обновления весов межнейронных связей значительно уменьшается и стабилизируется на уровне около 10 наносекунд. Кроме того, было исследовано влияние размера мини-батча на производительность. Мини-батч представляет собой группу данных, которая обрабатывается нейронной сетью за один проход. Результаты продемонстрировали, что увеличение размера мини-батча до определенного предела приводит к росту производительности нейросети, поскольку это позволяет более эффективно использовать параллельные ядра графического процессора, что обусловлено его архитектурой, оптимизированной для параллельных вычислений.

Однако при дальнейшем увеличении размера мини-батча производительность снижается из-за ограничений памяти на графическом процессоре. Оптимальный размер мини-батча зависит от архитектуры GPU, количества доступной памяти и размера модели. Для преодоления ограничений памяти GPU необходимо упорядочить данные в памяти, чтобы избежать конфликтов кэша, использовать разные типы данных с плавающей точкой (например, float32 и float16), чтобы уменьшить потребление памяти, а так же преобразовать числовых представлений в более компактные форматы (например, int8), чтобы снизить требования к памяти.

В дополнение к ограничениям памяти, обучение нейронных сетей на GPU может столкнуться с следующими проблемами:

1. Вычислительные возможности не безграничны, и для больших и сложных моделей может потребоваться увеличение количества GPU или использование более мощных графических процессоров.
2. Передача данных между процессором (CPU) и GPU может стать узким местом из-за ограниченной пропускной способности шины.

Для преодоления этих ограничений необходимо выявить причину задержек в вычислениях. Если задержки вызваны недостаточной вычислительной мощностью GPU, в данном случае рекомендуется оптимизировать отдельные функции, например, предварительно вычисляя данные на ранних этапах обучения. Если же задержки связаны с объемами передаваемых данных, целесообразно сгруппировать больше операций в одной функции, избегая избыточных этапов вычислений.

Перевод реализации алгоритма на графический процессор требует существенной модификации, особенно в части организации работы с памятью и учета ограничений, накладываемых архитектурой GPU. Основными этапами являются выявление параллелизуемых частей алгоритма, определение данных, которые должны быть перемещены на GPU, разработка параллельных ядер для графического процессора, оптимизация передачи данных между CPU и GPU, мониторинг производительности и внесение дальнейших оптимизаций. Перевод алгоритма на GPU может оказаться сложной задачей, но это предоставляет значительное ускорение для обучения нейронной сети. Следуя этим рекомендациям, можно оптимизировать использование GPU и добиться максимальной производительности в задачах анализа данных.

### Библиографический список

1. Ивченко, В. Д. Применение нейросетевых технологий в различных областях науки и техники. Текст / В. Д. Ивченко, С. С. Кананадзе // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика – 2005 – № 6 – с. 28-29.
2. Хайкин С. Нейронные сети. Полный курс. 2-е изд. / С. Хайкин – М.: Вильямс – 2006 – 1104 с.
3. Талалаев А.А., Фраленко В.П. Архитектура комплекса конвейерно-параллельной обработки данных в гетерогенной вычислительной среде // Вестник РУДН. Серия Математика. Информатика. Физика. — 2013. — № 3. — С. 113-117
4. Фраленко В.П. Нейросетевое шифрование с применением архитектуры «кодер/декодер» // Нейрокомпьютеры: разработка и применение. — 2010. — № 5. — С. 11-16.

УДК 004; ГРНТИ 50.43.19

## ЛИНЕАРИЗУЕМЫЕ СИСТЕМЫ С НЕЯВНЫМ ПЛАНИРОВАНИЕМ ТРАЕКТОРИИ И ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

М.Д. Корниенко

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, [kornienko.mashenka@gmail.com](mailto:kornienko.mashenka@gmail.com)

*Аннотация.* Мы разрабатываем основанную на оптимизации основу для совместного планирования траектории в реальном времени и управления с обратной связью для систем с обратной связью. Для достижения этой цели мы определяем целевую траекторию как оптимальное решение изменяющейся во времени задачи оптимизации. Однако в общем случае такая траектория может оказаться неосуществимой, например, из-за неголономных ограничений. Чтобы решить эту проблему, мы разрабатываем закон управления, который генерирует допустимые траектории, которые асимптотически сходятся к целевой траектории. Точнее, для систем, которые являются (динамическими) линеаризуемыми в полном состоянии, предложенный закон управления неявно преобразует нелинейную систему в алгоритм оптимизации достаточно высокого порядка. Мы доказываем глобальную экспоненциальную сходимость к целевой траектории как для алгоритма оптимизации, так и для исходной системы. Мы иллюстрируем эффективность предложенного нами метода для многообъектных или многоагентных задач отслеживания с ограничениями.

*Ключевые слова:* оптимизация с изменением во времени, планирование движения, линеаризация обратной связи, определитель диагональной блочной матрицы.

## LINEARIZABLE SYSTEMS WITH IMPLICIT PATH PLANNING AND FEEDBACK

M.D. Kornienko

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, [kornienko.mashenka@gmail.com](mailto:kornienko.mashenka@gmail.com)

*The summary.* We develop an optimization-based framework for joint real-time trajectory planning and feedback control for systems with feedback. To achieve this goal, we define a target trajectory as the optimal solution to a time-varying optimization problem. However, such a trajectory may not be feasible in the general case, e.g., due to nonholonomic constraints. To address this problem, we develop a control law that generates admissible trajectories that asymptotically converge to the target trajectory. More precisely, for systems that are (dynamically) linearizable in the full state, the proposed control law implicitly transforms the nonlinear system into a sufficiently high-order optimization algorithm. We prove global exponential convergence to the target trajectory for both the optimization algorithm and the original system. We illustrate the effectiveness of our proposed method for multi-object or multi-agent tracking problems with constraints.

*Keywords:* time-varying optimization, motion planning, feedback linearization, diagonal block matrix determinant.

Способность проектировать и реализовывать безопасные траектории для нелинейных систем составляет один из основных столпов развития автономных систем. Таким образом, неудивительно, что планирование движения и управление им становится все более популярным предметом исследований как в промышленности, так и в научных кругах. В общем, эта проблема обычно решается в двухэтапном подходе. На первом этапе, известном как планирование движения, проектируются траектории — обычно путем решения задачи оптимизации — которые выполнимы, или, другими словами, траектории, учитывающие препятствия и системные ограничения. На втором этапе разрабатываются контроллеры с обратной связью для отслеживания спроектированных траекторий и учета системных неопределенности. В частности, при реализации в режиме реального времени планирование движения обычно сводится к задачам линейной или квадратичной оптимизации [2].

Блочные матрицы повсеместно используются в теории управления и прикладной математике, естественным образом появляясь при описании систем с несколькими управляемыми переменными (например, управлении мобильными роботами, [1, 2, 3]). Кроме того,

блочные матрицы используются во многих вычислительных методах, знакомых исследователям гидродинамики [4, 5]. Необходимость вычисления определителей этих матриц почти одинаково распространена как для аналитических, так и для численных приложений [6, 7].

Пусть дана матрица

$$H = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & I_m & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & I_m & \dots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & I_m \\ -\tilde{C}_0 & -\tilde{C}_1 & -\tilde{C}_2 & \dots & -\tilde{C}_{k-1} \end{bmatrix}$$

размерностью  $n \times n$ ,  $n = m \cdot k$ . При этом матрицы  $\mathbf{0}$ ,  $I_m$  являются соответственно нулевой и единичной матрицами, обе размерностью  $m \times m$ . Такую же размерность имеют диагональные матрицы

$$\tilde{C}_i = \begin{bmatrix} a_{1,i} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & a_{2,i} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & a_{m,i} \end{bmatrix}, i = \overline{0, k-1}, (**)$$

с постоянными положительными элементами  $a_{j,i} > 0, j = \overline{1, m}$ . Здесь  $n, m, k$  являются вещественными числами. Подлежащая рассмотрению матрица является обобщением матрицы Гурвица, используемой в [2] для синтеза систем управления

$$H = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots \\ a_0 & a_1 & a_2 & \dots & a_{k-1} \end{bmatrix} \otimes I_m$$

Отсюда характеристическая матрица

$$T = pI_n - H = \begin{bmatrix} pI_m & -I_m & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & pI_m & -I_m & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & pI_m & -I_m \\ \tilde{C}_0 & \tilde{C}_1 & \tilde{C}_2 & \dots & \tilde{C}_{k-2} & pI_m + \tilde{C}_{k-1} \end{bmatrix}.$$

**Теорема.** Определитель матрицы  $T$  можно вычислить по выражению  $\det(T) = \det(T_{k-2})$ ,

где

$$T_{k-2} = \begin{bmatrix} pI_m & -I_m \\ \tilde{C}_0 & D_{k-2} \end{bmatrix}$$

и

$$\begin{aligned} D_{k-2} &= p^{k-1}I_m + p^{k-2}\tilde{C}_{k-1} + p^{k-3}\tilde{C}_{k-2} + \dots + p\tilde{C}_2 + \tilde{C}_1. \\ D &= pI_m + \tilde{C}_{k-1}, D_1 = pD + \tilde{C}_{k-2} = p^2I_m + p\tilde{C}_{k-1} + \tilde{C}_{k-2}, D_2 = pD_1 + \tilde{C}_{k-3} = p^3I_m + p^2\tilde{C}_{k-1} + p\tilde{C}_{k-2} + \tilde{C}_{k-3}, \dots \\ D_i &= pD_{i-1} + \tilde{C}_{k-i-1} = p^{i+1}I_m + p^i\tilde{C}_{k-1} + p^{i-1}\tilde{C}_{k-2} + \dots + p\tilde{C}_{k-i} + \tilde{C}_{k-i-1}, k = i + 2, \\ D_{k-2} &= pD_{k-1} + \tilde{C}_1 = p^{k-1}I_m + p^{k-2}\tilde{C}_{k-1} + p^{k-3}\tilde{C}_{k-2} + \dots + p\tilde{C}_2 + \tilde{C}_1, i = k - 2. \end{aligned}$$

Так что при  $D_0 = D$

$$D_i = pD_{i-1} + \tilde{C}_{k-i-1}, i = \overline{1, k-2}.$$

Полагая  $i = k - 2$ , получаем

$$D_{k-2} = p^{k-1}I_m + p^{k-2}\tilde{C}_{k-1} + p^{k-3}\tilde{C}_{k-2} + \dots + p\tilde{C}_2 + \tilde{C}_1.$$

Введем обозначения

$$C = [\tilde{C}_0 \quad \tilde{C}_1 \quad \dots \quad \tilde{C}_{k-2} \quad \tilde{C}_{k-1}],$$

$$C_1 = [\tilde{C}_0 \quad \tilde{C}_1 \quad \dots \quad \tilde{C}_{k-3} \quad \tilde{C}_{k-2}], \dots,$$

$$C_i = [\tilde{C}_0 \quad \tilde{C}_1 \quad \dots \quad \tilde{C}_{k-i-3} \quad \tilde{C}_{k-i-2}],$$

$$C_{k-3} = [\tilde{C}_0 \quad \tilde{C}_1], C_{k-2} = \tilde{C}_0.$$

$$T = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A - BD^{-1}C & B \\ \mathbf{0} & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & \mathbf{0} \\ D^{-1}C & I \end{bmatrix},$$

$$\det(T) = \det(A - BD^{-1}C) \det(D),$$

$$A - BD^{-1}C = \begin{bmatrix} pI_m & -I_m & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & pI_m & -I_m & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & pI_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \vdots \\ -I_m \end{bmatrix} D^{-1} [\tilde{C}_0 \quad \tilde{C}_1 \quad \dots \quad \tilde{C}_{k-3} \quad \tilde{C}_{k-2}] =$$

$$= \begin{bmatrix} pI_m & -I_m & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & pI_m & -I_m & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & pI_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ D^{-1}\tilde{C}_0 & D^{-1}\tilde{C}_1 & \dots & D^{-1}\tilde{C}_{k-3} & D^{-1}\tilde{C}_{k-2} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} pI_m & -I_m & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & pI_m & -I_m & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ D^{-1}\tilde{C}_0 & D^{-1}\tilde{C}_1 & D^{-1}\tilde{C}_2 & \dots & D^{-1}\tilde{C}_{k-3} & pI_m + D^{-1}\tilde{C}_{k-2} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} pI_m & -I_m & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & pI_m & -I_m & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ D^{-1}\tilde{C}_0 & D^{-1}\tilde{C}_1 & D^{-1}\tilde{C}_2 & \dots & D^{-1}\tilde{C}_{k-3} & D^{-1}Dp + \tilde{C}_{k-2} \end{bmatrix} =$$

$$= D^{-1}T_1.$$

$$= \det(A - BD^{-1}C) = \det(D^{-1}) \det(T_1)$$

$$\det(T) = \det(A - BD^{-1}C) \det(D) = \det(D) \det(D^{-1}) \det(T_1),$$

$$\det(T) = \det(T_1).$$

$$T_1 = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 - B_1 D_1^{-1} C_1 & B_1 \\ \mathbf{0} & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & \mathbf{0} \\ D_1^{-1} C_1 & I \end{bmatrix}$$

Множители, расположенные во всех элементах какой-либо строке, можно выносить за знак определителя

$$A_1 = \begin{bmatrix} pI_m & -I_m & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & pI_m & -I_m & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & pI_m \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ -I_m \end{bmatrix}, C_1 = [\tilde{C}_0 \quad \tilde{C}_1 \quad \cdots \quad \tilde{C}_{k-4} \quad \tilde{C}_{k-3}], D_1 = pD + \tilde{C}_{k-1}.$$

$$\det(T) = \det(A_1 - B_1 D_1^{-1} C_1) \det(D_1) = \det(D_1) \det(D_1^{-1}) \det(T_1),$$

$$\det(T) = \det(T_1).$$

$$\det T_2 = \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_2 - B_2 D_2^{-1} C_2 & B_2 \\ 0 & D_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I & 0 \\ D_2^{-1} C_2 & I \end{bmatrix}, \det(A_2 - B_2 D_2^{-1} C_2) = \det(D_2^{-1}) \det(T_2),$$

$$\det(T_2) = \det(A_2 - B_2 D_2^{-1} C_2) \det(D_2) = \det(D_2) \det(D_2^{-1}) \det(T_2), \det(T) = \det(T_2), \dots,$$

$$\det(T_i) = \det(A_i - B_i D_i^{-1} C_i) \det(D_i) = \det(D_i) \det(D_i^{-1}) \det(T_i), \det(T) = \det(T_i),$$

$$\det(T_{k-2}) = \det(A_{k-2} - B_{k-2} D_{k-2}^{-1} C_{k-2}) \det(D_{k-2}) = \det(D_{k-2}) \det(D_{k-2}^{-1}) \det(T_{k-2}), \det(T) = \det(T_{k-2}),$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} pI_m & -I_m & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & pI_m & -I_m & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & pI_m \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ -I_m \end{bmatrix}, C_2 = [\tilde{C}_0 \quad \tilde{C}_1 \quad \cdots \quad \tilde{C}_{k-5} \quad \tilde{C}_{k-4}], D_2 = pD_1 + \tilde{C}_{k-2}.$$

$$A_i = \begin{bmatrix} pI_m & -I_m & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & pI_m & -I_m & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & pI_m \end{bmatrix}, B_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ -I_m \end{bmatrix}, C_i = [\tilde{C}_0 \quad \tilde{C}_1 \quad \cdots \quad \tilde{C}_{k-i-3} \quad \tilde{C}_{k-i-2}], D_i = pD_{i-1} + \tilde{C}_{k-i}$$

$$T_{k-2} = \begin{bmatrix} pI_m & -I_m \\ \tilde{C}_0 & D_{k-2} \end{bmatrix}, \det(T) = \det(Q),$$

$$Q = pI_m D_{k-2} + I_m \tilde{C}_0 = p^k I_m + p^{k-1} \tilde{C}_{k-1} + p^{k-2} \tilde{C}_{k-2} + \cdots + p \tilde{C}_1 + \tilde{C}_0 =$$

$$= \text{diag}[q_1(p), \dots, q_i(p), \dots, q_m(p)],$$

$$\det(Q) = \prod_{i=1}^m q_i(p),$$

$$q_{q_i(p)}(p) = p^k + p^{k-1} a_{k-1,i} + p^{k-2} a_{k-2,i} + \cdots + p a_{1,i} + a_{0,i}.$$

Вычисление определителя  $Q$  дает результат  $\det(Q) = \prod_{i=1}^m q_i(p)$  где мы использовали тот

факт, что определитель блочной треугольной матрицы является произведением определителей ее диагональных блоков.

### Библиографический список

1. Zheng T., Simpson-Porco J., and Mallada E. Implicit Trajectory Planning for Feedback Linearizable Systems: A Time-varying Optimization Approach. Proc. Amer. Control Conf. 2020, pp. 4677-4682.
2. Бобиков А.И. Корниенко М.Д. Оптимальное нестационарное управление многосвязными системами. Вестник Рязанского государственного университета. 2023. №84. С. 176-185.
3. Silvester John R. Determinants of Block Matrices. Mathematical Gazette, 2000, 84 (501), pp. 460-467
4. Hespánha J.P. Linear Systems Theory. Princeton University Press // Princeton University Press, Feb 13, 2018. Mathematics. 352 p
5. Powell P.D. Calculating Determinants of Block Matrices. Published 16 December 2011. Mathematics arXiv: Rings and Algebras.

УДК 519.816

**РЕШЕНИЕ НЕЧЕТКОЙ БИМАТРИЧНОЙ ИГРЫ****В.Г. Чернов**

*Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых,  
Россия, Владимир, Vladimir.chernov44@mail.ru,*

*Аннотация.* Биматричные игры используются как модель принятия решений в ситуациях, когда стремление каждого из участников к получению наиболее выгодного результата не противоречит интересам другого. В отличие от традиционных подходов предполагается наличие неопределенности в представлениях игроков о ситуации, требующей принятия решений, что предлагается учитывать, используя для формализации игры матрицы с нечеткими элементами. Рассматривается метод нахождения игроками наилучших стратегий в нечеткой биматричной игре, обеспечивающих согласованный результат.

*Ключевые слова:* биматричная игра, матрица игры, нечеткое число, функция принадлежности.

**SOLVING A FUZZY BIMATRIC GAME****V.G. Chernov**

*Vladimir State University named after N.G. and A.G. Stoletov,  
Russian Federation, Vladimir, vladimir.chernov44@mail.*

*The summary.* Bimatrix games are used as a decision-making model in situations where the desire of each participant to obtain the most profitable result does not contradict the interests of the other. Unlike traditional approaches, it is assumed that there is uncertainty in the players' ideas about the situation requiring decision-making, which is proposed to be taken into account by using matrices with odd elements to formalize the game. A method is considered for players to find the best strategies in a fuzzy bimatrix game, providing a consistent result.

*Keywords:* bimatrix game, game matrix, fuzzy number, membership function.

**1. Введение**

Биматричные игры отличаются от антагонистических матричных игр отсутствием конфликта между участниками, т.е. для каждого из них стремление к наилучшему результату не противоречит интересам другого.

Традиционная форма биматричной игры предполагает задание множества стратегий игроков

$$A = \{a_i : A = \{a_i : i = \overline{1, J}\}, B = \{b_j : j = \overline{1, J}\}, I \neq J \quad (1)$$

и соответствующих матриц  $M_A = \|m_{ij}^A\|, M_B = \|m_{ij}^B\|,$

где  $m_{ij}^A, m_{ij}^B$  – оценки последствий от возможных решений.

Классическая теория антагонистических матричных игр опирается на так называемое положение об общем знании, которое гласит: игра со всеми правилами известна игрокам и каждый из них знает, что все участники осведомлены о том, что известно остальным партнерам по игре. И такое положение сохраняется до конца игры [1,2]. Аналогичный подход присутствует и в классической теории биматричных игр. Как и в антагонистических играх в биматричных определяющим фактором является качество построения платежных матриц. Применительно к антагонистическим играм трудности, которые с которыми приходится сталкиваться при построении платежной матрицы сформулированы в [3]. С достаточным основанием их можно отнести и к биматричным играм, что позволяет говорить о присутствии фактора неопределенности при определении значений элементов платежных матриц. Задачи, которые формализуются биматричными игровыми моделями, можно разделить на два вида: первый, когда ситуация, требующая принятия решений, имеет определенную предысторию и на основе прошлых реализаций, например средствами имитационного моделирования можно оценить возможные значения параметров задачи; второй, когда для принятия решений мож-



но рассчитывать только на экспертные оценки, которым принципиально свойственна неопределенность нестатистического характера.

Первый тип задач, которые формализуются биматричными играми достаточно основательно исследован [4]. Второй - исследован только для частных ситуаций, в которых элементы нечетких матриц имеют только один линейно-кусочный тип функций принадлежности. В классических биматричных играх возможно наличие либо равновесных, либо неравновесных ситуаций. В первом случае задача решается в чистых стратегиях, во втором- в смешанных.

Сразу необходимо отметить, что в любом варианте при нахождении решения с нечеткими параметрами игры возникает специфическая задача сравнения нечетких чисел, которая в общем случае требует специального исследования.

Отдельного рассмотрения требует вопрос о смешанных стратегиях, если элементы матриц игры нечеткие числа с произвольными типами функций принадлежности. Главным условием корректного использования смешанных стратегий является многократная реализация игры с неизменными условиями, что в реальных ситуациях вряд ли реализуемо. Кроме того, при нечеткой формулировке игры возможно, что все или несколько элементов матриц игры определены как нечеткие интервалы, для которых функции принадлежности имеют трапецеидальный вид (рис.1) и тогда при каждой новой реализации игры могут появиться любые значения из интервала  $[x_{ij}^1, x_{ij}^2]$ , т.е. каждый раз исходные условия задачи будут другими. При этом, отсутствуют какие-либо доказательства, какое значение будет иметь место в конкретный момент принятия решения. Таким образом, в ситуации, когда элементы матриц игры заданы в нечетком виде нарушаются не только условия использования смешанных стратегий, но и положение об общем знании.

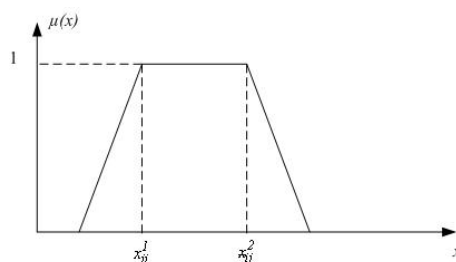


Рис.1. Трапецеидальная функция принадлежности нечеткого элемента платежной матрицы

### 3. Постановка и решение задачи

Пусть имеется некоторая ситуация, требующая принятия решения, формальной моделью которой может быть биматричная игра. При этом в силу имеющихся обстоятельств значения элементов матриц игры заданы в виде нечетких чисел, для которых тип функций принадлежности определяется только субъективными представлениями лиц, формирующих матрицы игры. Как было показано выше, в этом случае нарушаются условия для корректного применения смешанных стратегий и классическое положение об общем знании. В последнем случае становится реальной ситуация, когда знания игроков о возможных действиях других участников не являются совершенно достоверными, т.е. выбирая стратегию  $a_i \in A$  первый игрок допускает возможность выбора другим любой  $b_j \in B$ . Тогда результат выбора  $a_i \in A$  должен оцениваться как интегральный по всему множеству вариантов решений второго игрока. Аналогичное положение будет справедливо и для другого участника. В сформулированных условиях игроки должны решить следующие задачи: первая - определение способа вычисления интегральной оценки для каждого из возможных решений, вторая – определение наиболее выгодного решения, третья- поскольку игра не конфликтная найти способ нахождения результата сделанных решений, устраивающего обе стороны.

Нечеткая биматричная игра определена двумя матрицами

$$\tilde{M}_A = \|\tilde{m}_{ij}^A\|, \tilde{M}_B = \|\tilde{m}_{ij}^B\|,$$

где  $\tilde{m}_{ij}^A = \{\mu_{ij}^A(x)\}$ ,  $\tilde{m}_{ij}^B = \{\mu_{ij}^B(x)\}$  – нечеткие оценки последствий возможных решений с функциями принадлежности  $\mu_{ij}^A(x)$ ,  $\mu_{ij}^B(x)$ , тип которых определяется участниками игры независимо друг от друга;

$x \in [x_{min}, x_{max}]$  – область определения возможных результатов.

Интегральная оценка возможных решений рассчитывается на основе преобразования FztoTriangle, определенного в нечеткой таблице FuzzyCalc фирмы FuzzyWare с тем лишь отличием, что преобразование применяется не к отдельному нечеткому множеству, а ко всей совокупности нечетких множеств, образующих  $i$ -ую строку матрицы  $\tilde{M}_A$ ,  $j$ -ую строку матрицы  $\tilde{M}_B$ . Алгоритм такого применения преобразования FztoTriangle подробно рассмотрен в [5].

В результате для каждой стратегии игроков будут получены эквивалентные нечеткие множества с треугольными функциями принадлежности

$$\tilde{E}(a_i) = \{\mu(a_i, x)\}, \tilde{E}(b_j) = \{\mu(b_j, x)\}, x \in [x_{min}, x_{max}], i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}, \quad (2)$$

определяющие возможные результаты принятых решений.

Для определения наилучшего решения необходимо сравнить между собой нечеткие оценки возможных решений игроков. Поскольку нечеткие множества(числа) имеют треугольные функции принадлежности эта процедура упрощается.

Обозначим через  $\tilde{E}_A$  и  $\tilde{E}_B$  наиболее выгодные оценки для каждого из игроков. В общем случае  $\tilde{E}_A \neq \tilde{E}_B$ , соответственно возникает вопрос о согласованном результате. В качестве такого стороны могут согласиться на оценку  $R = \tilde{E}_A \cap \tilde{E}_B$ , но пересечение нечетких множеств формализуется операцией  $\min$ , недостатком которой является использование только минимальных значений соответствующих функций принадлежности, что может привести к потере необходимой информации. Поэтому в данной задаче предлагается использовать граничное пересечение, рассчитываемое по формуле

$$R = \max\{\mu(a^*, x) + \mu(b^*, x) - 1, 0\},$$

где  $a^*, b^*$ - наиболее выгодные стратегии игроков.

### Библиографический список

1. Myerson R.B. Game theory: analysis of conflict./ R.B.Myerson // London. Harvard: Harvard University Press, - 1997.-584р.
2. Geanakoplos J. Common Knowledge. Handbook of GameTheory.v.2./J. Geanakoplos // ed. R. Aumann and S. Hart: Elsiever Science B.V,1994.
3. Сигал А. В. Теоретико-игровая модель принятия инвестиционных решений.- Ученые записки Таврического национального университета имени В.И. Вернадского, серия «Экономика и управление». 2011. №1. т. 24(63). – С.193-205.
4. Bigdeli H., Hassanpour H., Tayyebi J. Constrained Bimatrix Games with Fuzzy Goals and its Application in Nuclear Negotiations/ H. Bigdeli, H. Hassanpour, J. Tayyebi / Iranian Journal of Numerical Analysis and Optimization. 2018. No. 1. Vol. 8. – pp. 81-109 DOI:10.22067/ijnao.v8i1.55385
5. Чернов В.Г. Нечеткая модель принятия решений в условиях неопределенности, основанная на преобразовании FztoTriangle / В.Г. Чернов / Вестник Ижевского государственного технического университета, «Интеллектуальные системы в производстве». –2022. – №1. – т.20. – С. 88-95.

УДК 621.371; ГРНТИ 50

## КОМПЛЕКСНАЯ НЕЙРОННАЯ СЕТЬ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ИНВЕРСНОЙ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА

В.П. Кузнецов

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, kuznetsovaitu@yandex.ru

*Аннотация.* Разработана комплексная нейронная сеть прямого распространения для построения инверсной модели объекта, на входе и выходе которого наблюдаются комплексные сигналы. Нейронная сеть содержит комплексные весовые коэффициенты и функции активации в виде функций комплексной переменной. Приводятся результаты экспериментального исследования комплексной нейронной сети в задаче построения инверсной модели нелинейного усилителя мощности.

*Ключевые слова:* нейронная сеть, весовой коэффициент, функция активации, сигнал ошибки, алгоритм обучения, целевая функция, градиент, частная производная.

## COMPLEX NEURAL NETWORK FOR CONSTRUCTION OF OBJECT INVERSE MODEL

V.P. Kuznetsov

Ryazan State Radio Engineering University named after V.P. Utkin,  
Russia, Ryazan, kuznetsovaitu@yandex.ru

*The summary.* Complex neural network of a feed-forward network is proposed. The network contains the complex weights and the complex activation functions as a complex variable function. The results of experimental research of complex neural network for construction of nonlinear power amplifier inverse model are presented.

*Key words:* neural network, weight coefficient, activation function, error signal, learning algorithm, target function, gradient, partial derivative.

### Постановка задачи

Нейронные сети, как инструмент искусственного интеллекта, находят широкое применение для решения задач идентификации, предсказания, прогнозирования, управления в системах управления и телекоммуникаций, в которых используются аналитические сигналы, основанные на преобразовании Гильберта [1]. Аналитический сигнал является комплексным сигналом и должен обрабатываться системой как единое целое. Такая же задача ставится перед нейронной сетью, определяя ее комплексный характер.

В работе [2] предложена концепция построения комплексной нейронной сети на примере задачи идентификации. В данной работе комплексная нейронная сеть применяется для построения инверсной модели системы (рис. 1).

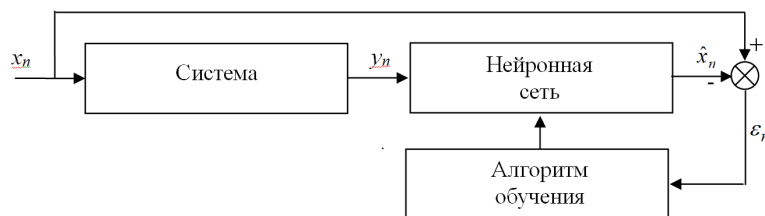


Рис. 1

### Структура нейронной сети

Решение задачи предлагается искать на основе двухслойной нейронной сети прямого распространения (рис. 2). В первом слое стоят нелинейные нейроны с комплексными весо-

выми коэффициентами и функциями активации в виде функции комплексной переменной  $f(q)$ . Выходной слой представлен одним линейным нейроном.

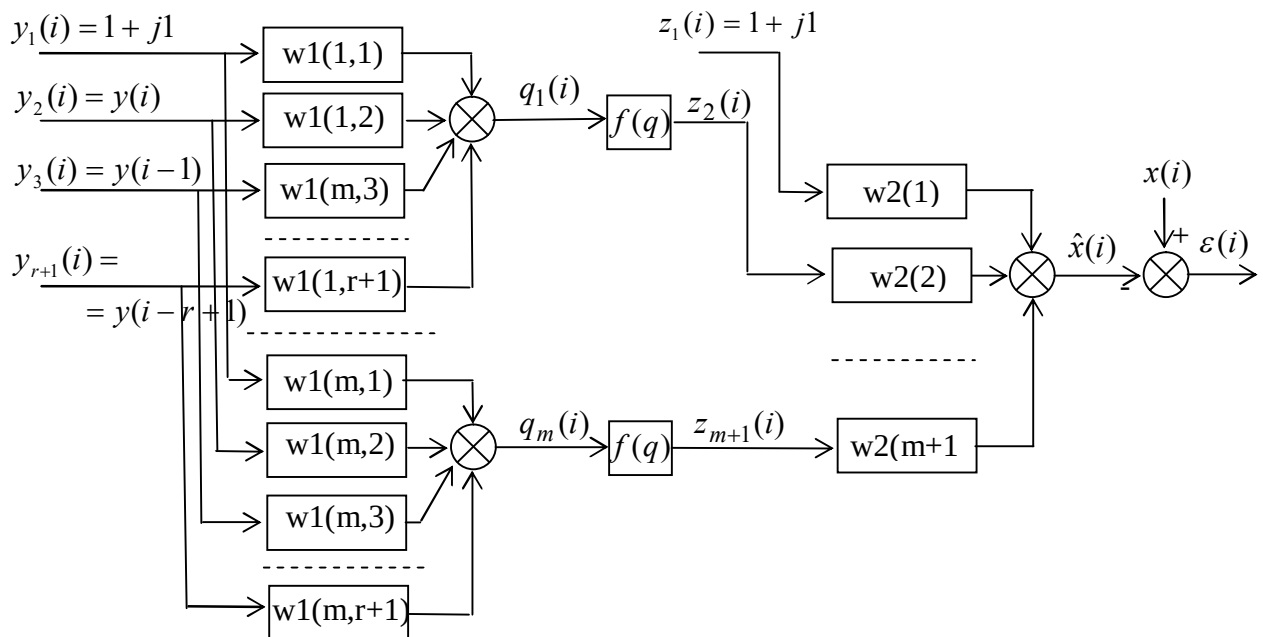


Рис. 2.

В качестве функции активации предлагается использовать функцию комплексной переменной, которая, сохраняя фазу входного сигнала, преобразует его модуль внутрь окружности единичного радиуса с центром в начале координат комплексной плоскости. Комплексную функцию активации с такими свойствами можно получить из известных вещественных функций активации. Это, во-первых, алгебраическая сигмоида [3]  $y = x / \sqrt{1 + x^2}$  и функция SoftSign [4]  $y = x / (1 + |x|)$ . Экспериментальные исследования показали, что предложенные функции активации сопровождаются примерно одинаковой эффективностью обучения. Однако функция SoftSign приводит к меньшему объему вычислений на этапе нахождения ее частных производных. Создадим на ее основе комплексную функцию активации

$$z = \frac{q}{1 + |q|} = \frac{q_u + jq_v}{1 + \sqrt{q_u^2 + q_v^2}} = \frac{q_u}{1 + \sqrt{q_u^2 + q_v^2}} + j \frac{q_v}{1 + \sqrt{q_u^2 + q_v^2}} = f_u(q_u, q_v) + j f_v(q_u, q_v).$$

Выходной сигнал нейронной сети  $\hat{x}(i)$  в настоящий момент времени  $t_i$  формируется на основе входного отсчета  $y(i)$  и  $(r-1)$  входных отсчетов (задержек) в предыдущие моменты времени. Таким образом, выходной сигнал сети описывается функцией регрессии

$$\hat{x}(i) = \phi(y(i), y(i-1), y(i-2), \dots, y(i-r+1)),$$

причем функция  $\phi$  конструируется структурой и параметрами сети.

### Алгоритм обучения

При построении нейронной сети экспериментальный материал, которым располагает исследователь, делится на обучающую и тестовую части. Из первой части формируется множество обучающих примеров, которое многократно предъявляется нейронной сети. После обучения нейронная сеть проверяется на тестовом множестве примеров.

В данной работе используется последовательный режим обучения, основанный на минимизации квадрата модуля мгновенной ошибки  $\varepsilon(i) = x(i) - \hat{x}(i) = \varepsilon_u(i) + j\varepsilon_v(i)$ :

$$E(i) = \frac{1}{2} |\varepsilon(i)|^2 = \frac{1}{2} (\varepsilon_u^2(i) + \varepsilon_v^2(i)) \rightarrow \min_{W_u, W_v}.$$

Здесь:  $\varepsilon_u, \varepsilon_v$  – вещественная и мнимая составляющие сигнала ошибки,  $N$  – число примеров обучения в пакете,  $W_u, W_v$  – векторы вещественных и мнимых частей весовых коэффициентов. Таким образом, целевая функция рассматривается как вещественная функция многих переменных, в качестве которых выступают вещественные и мнимые части весовых коэффициентов первого и второго слоев.

Минимизацию целевой функции проведем методом градиента:

$$W(i+1) = W(i) - h \cdot \text{grad } E(i), \quad i = 0, 1, 2, \dots$$

Здесь  $W$  – вектор всех аргументов целевой функции,  $i$  – номер примера,  $h$  – параметр обучения,  $\text{grad}$  – вектор-градиент частных производных целевой функции по каждому аргументу.

Рассмотрим обучение выходного нейрона. Найдем частные производные целевой функции по каждому весовому коэффициенту, представленному вещественной и мнимой частями. Частную производную по вещественной части коэффициента  $W2(l)$ ,  $l = \overline{1, m+1}$ , найдем следующим образом:

$$\frac{\partial E}{\partial W2_u(l)} = \left[ \varepsilon_u(i) \frac{\partial \varepsilon_u(i)}{\partial W2_u(l)} + \varepsilon_v(i) \frac{\partial \varepsilon_v(i)}{\partial W2_u(l)} \right], \quad l = \overline{1, m+1}.$$

Вещественная и мнимая части сигнала ошибки имеют вид:

$$\varepsilon_u(i) = x_u(i) - \hat{x}_u(i), \quad \varepsilon_v(i) = x_v(i) - \hat{x}_v(i).$$

Поэтому частная производная

$$\frac{\partial E}{\partial W2_u(l)} = -\varepsilon_u(i) \frac{\partial \hat{x}_u(i)}{\partial W2_u(l)} - \varepsilon_v(i) \frac{\partial \hat{x}_v(i)}{\partial W2_u(l)}, \quad l = \overline{1, m+1}. \quad (1)$$

Выходной сигнал нейронной сети

$$\hat{x}(i) = \sum_{n=1}^{m+1} z_n(i) \cdot W2(n) = \sum_{n=1}^{m+1} [z_{n,u}(i) + j z_{n,v}(i)] \cdot [W2_u(n) + j W2_v(n)]. \quad (2)$$

После очевидных преобразований получим:

$$\hat{x}(i) = \sum_{n=1}^{m+1} \left\{ [z_{n,u}(i) W2_u(n) - z_{n,v}(i) W2_v(n)] + j [z_{n,u}(i) W2_v(n) + z_{n,v}(i) W2_u(n)] \right\}. \quad (3)$$

От весового коэффициента  $W2(l)$  зависит только одно слагаемое в этой сумме при  $n = l$ . Поэтому частные производные

$$\frac{\partial \hat{x}_u(i)}{\partial W2_u(l)} = z_{l,u}(i), \quad \frac{\partial \hat{x}_v(i)}{\partial W2_u(l)} = z_{l,v}(i).$$

В итоге получим:

$$\frac{\partial E}{\partial W_{2_u}(l)} = -\varepsilon_u(i)z_{l,u}(i) - \varepsilon_v(i)z_{l,v}(i), \quad l = \overline{1, m+1}.$$

Частная производная по мнимой части коэффициента  $W_{2}(l)$ ,  $l = \overline{1, m+1}$ , вычисляется аналогично:

$$\frac{\partial E}{\partial W_{2_v}(l)} = \varepsilon_u(i)\frac{\partial \varepsilon_u(i)}{\partial W_{2_v}(l)} + \varepsilon_v(i)\frac{\partial \varepsilon_v(i)}{\partial W_{2_v}(l)}, \quad l = \overline{1, m+1}.$$

Повторяя предыдущие преобразования, установим:

$$\frac{\partial E}{\partial W_{2_v}(l)} = \varepsilon_u(i)z_{l,v}(i) - \varepsilon_v(i)z_{l,u}(i), \quad l = \overline{1, m+1}.$$

Перейдем к обучению нейронов первого слоя. Вычислим частные производные целевой функции по коэффициенту  $W_{1}(1,1) = W_{1_u}(1,1) + jW_{1_v}(1,1)$ , а затем обобщим результаты на остальные коэффициенты первого слоя. Найдем частную производную по вещественной части этого коэффициента, отталкиваясь от соотношения (1):

$$\frac{\partial E}{\partial W_{1_u}(1,1)} = -\varepsilon_u(i)\frac{\partial \hat{x}_u(i)}{\partial W_{1_u}(1,1)} - \varepsilon_v(i)\frac{\partial \hat{x}_v(i)}{\partial W_{1_u}(1,1)}. \quad (4)$$

Дальнейшие рассуждения проведем в русле соотношений (2) и (3), а затем обратим внимание на то, что от коэффициента  $W_{1}(1,1)$  зависит только сигнал  $z_2(i)$ . Поэтому частные производные

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{x}_u(i)}{\partial W_{1_u}(1,1)} &= W_{2_u}(2)\frac{\partial z_{2,u}(i)}{\partial W_{1_u}(1,1)} - W_{2_v}(2)\frac{\partial z_{2,v}(i)}{\partial W_{1_u}(1,1)}, \\ \frac{\partial \hat{x}_v(i)}{\partial W_{1_u}(1,1)} &= W_{2_v}(2)\frac{\partial z_{2,u}(i)}{\partial W_{1_u}(1,1)} + W_{2_u}(2)\frac{\partial z_{2,v}(i)}{\partial W_{1_u}(1,1)}. \end{aligned}$$

Подставим этот результат в (4) и сгруппируем слагаемые следующим образом:

$$\frac{\partial E}{\partial W_{1_u}(1,1)} = -[\varepsilon_u(i)W_{2_u}(2) + \varepsilon_v(i)W_{2_v}(2)]\frac{\partial z_{2,u}(i)}{\partial W_{1_u}(1,1)} - [-\varepsilon_u(i)W_{2_v}(2) + \varepsilon_v(i)W_{2_u}(2)]\frac{\partial z_{2,v}(i)}{\partial W_{1_u}(1,1)}. \quad (5)$$

Для вычисления производных от сигнала  $z_2(i)$  представим его в виде вещественной и мнимой частей (аргумент  $i$  опустим):

$$z_2 = f(q_1) = f(q_{1,u} + jq_{1,v}) = f_u(q_{1,u}, q_{1,v}) + j f_v(q_{1,u}, q_{1,v}).$$

Рассмотрим производные

$$\begin{aligned} \frac{\partial z_{2,u}}{\partial W_{1_u}(1,1)} &= \frac{\partial f_u}{\partial q_{1,u}} \cdot \frac{\partial q_{1,u}}{\partial W_{1_u}(1,1)} + \frac{\partial f_u}{\partial q_{1,v}} \cdot \frac{\partial q_{1,v}}{\partial W_{1_u}(1,1)}, \\ \frac{\partial z_{2,v}}{\partial W_{1_u}(1,1)} &= \frac{\partial f_v}{\partial q_{1,u}} \cdot \frac{\partial q_{1,u}}{\partial W_{1_u}(1,1)} + \frac{\partial f_v}{\partial q_{1,v}} \cdot \frac{\partial q_{1,v}}{\partial W_{1_u}(1,1)}. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь первые множители зависят от конкретной функции активации, а вторые обусловлены линейной структурой сигнала  $q_1$ :

$$q_1 = \sum_{n=1}^{r+1} y_n W1(1, n) = \sum_{n=1}^{r+1} (y_{n,u} + jy_{n,v}) [W1_u(1, n) + jW1_v(1, n)].$$

Представим сигнал  $q_1$  в виде вещественной и мнимой частей:

$$q_1 = \sum_{n=1}^{r+1} [y_{n,u} W1_u(1, n) - y_{n,v} W1_v(1, n)] + j \sum_{n=1}^{r+1} [(y_{n,u} W1_v(1, n) + y_{n,v} W1_u(1, n))].$$

От коэффициента  $W1(1,1)$  зависят только первые слагаемые в каждой сумме, поэтому частные производные

$$\frac{\partial q_{1,u}}{\partial W1_u(1,1)} = y_{1,u}, \quad \frac{\partial q_{1,v}}{\partial W1_u(1,1)} = y_{1,v}. \quad (7)$$

С учетом этого результата выражения (6) примут более компактный вид:

$$\frac{\partial z_{2,u}}{\partial W1_u(1,1)} = \frac{\partial f_u}{\partial q_{1,u}} y_{1,u} + \frac{\partial f_u}{\partial q_{1,v}} y_{1,v}, \quad \frac{\partial z_{2,v}}{\partial W1_u(1,1)} = \frac{\partial f_v}{\partial q_{1,u}} y_{1,u} + \frac{\partial f_v}{\partial q_{1,v}} y_{1,v}.$$

Теперь частная производная (5) может быть представлена в окончательном виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial W1_u(1,1)} = & -[\varepsilon_u(i)W2_u(2) + \varepsilon_v(i)W2_v(2)] \cdot \left[ \frac{\partial f_u}{\partial q_{1,u}} y_{1,u}(i) + \frac{\partial f_u}{\partial q_{1,v}} y_{1,v}(i) \right] - \\ & - [-\varepsilon_u(i)W2_v(2) + \varepsilon_v(i)W2_u(2)] \cdot \left[ \frac{\partial f_v}{\partial q_{1,u}} y_{1,u}(i) + \frac{\partial f_v}{\partial q_{1,v}} y_{1,v}(i) \right]. \end{aligned}$$

Обобщим полученный результат на частные производные по вещественной части каждого весового коэффициента первого слоя:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial W1_u(l, n)} = & -[\varepsilon_u(i)W2_u(l+1) + \varepsilon_v(i)W2_v(l+1)] \cdot \left[ \frac{\partial f_u}{\partial q_{l,u}} x_{n,u}(i) + \frac{\partial f_u}{\partial q_{l,v}} x_{n,v}(i) \right] - \\ & - [-\varepsilon_u(i)W2_v(l+1) + \varepsilon_v(i)W2_u(l+1)] \cdot \left[ \frac{\partial f_v}{\partial q_{l,u}} x_{n,u}(i) + \frac{\partial f_v}{\partial q_{l,v}} x_{n,v}(i) \right], \quad l = \overline{1, m}, \quad n = \overline{1, r+1}. \end{aligned} \quad (8)$$

Частные производные по мнимой части каждого весового коэффициента первого слоя вычисляются аналогичным образом. В соотношениях (4), (5), (6) придется поменять только переменную дифференцирования  $W1_u(1,1)$  на  $W1_v(1,1)$ , а соотношения (7) примут другой вид:

$$\frac{\partial q_{1,u}}{\partial W1_v(1,1)} = -y_{1,v}, \quad \frac{\partial q_{1,v}}{\partial W1_v(1,1)} = y_{1,u}.$$

В итоге, частные производные по мнимой части каждого весового коэффициента первого слоя вычисляются таким образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial W1_v(l, n)} = & -[\varepsilon_u(i)W2_u(l+1) + \varepsilon_v(i)W2_v(l+1)] \cdot \left[ \frac{\partial f_u}{\partial q_{l,u}} (-x_{n,v}(i)) + \frac{\partial f_u}{\partial q_{l,v}} x_{n,u}(i) \right] - \\ & - [-\varepsilon_u(i)W2_v(l+1) + \varepsilon_v(i)W2_u(l+1)] \cdot \left[ \frac{\partial f_v}{\partial q_{l,u}} (-x_{n,v}(i)) + \frac{\partial f_v}{\partial q_{l,v}} x_{n,u}(i) \right], \quad l = \overline{1, m}, \quad n = \overline{1, r+1}. \end{aligned} \quad (9)$$

Соотношения (8), (9) содержат частные производные функций активации. Рассмотрим вычисление этих производных для функции активации SoftSign, описываемой выражением:

$$z = \frac{q}{1+|q|} = \frac{q_u + jq_v}{1 + \sqrt{q_u^2 + q_v^2}} = \frac{q_u}{1 + \sqrt{q_u^2 + q_v^2}} + j \frac{q_v}{1 + \sqrt{q_u^2 + q_v^2}} = f_u(q_u, q_v) + j f_v(q_u, q_v).$$

Частные производные имеют вид:

$$\frac{\partial f_u}{\partial q_u} = \frac{|q| + q_v^2}{(1+|q|)^2 \cdot |q|}, \quad \frac{\partial f_v}{\partial q_v} = \frac{|q| + q_u^2}{(1+|q|)^2 \cdot |q|}, \quad \frac{\partial f_u}{\partial q_v} = \frac{\partial f_v}{\partial q_u} = -\frac{q_u \cdot q_v}{(1+|q|)^2 \cdot |q|}.$$

### Экспериментальная часть

Комплексная нейронная сеть, реализованная в системе MATLAB, использована для построения инверсной модели нелинейного усилителя мощности, входной и выходной сигналы которого имеют комплексный характер. На рисунке 3 показаны вещественные и мнимые составляющие входного сигнала усилителя, приведенные в интервал (-1; 1). Для нейронной сети, представленной на рисунке 2, есть два основных параметра, определяющих точность аппроксимации желаемых откликов. Это число отсчетов входного сигнала  $r$  и число нейронов первого слоя  $m$ . Точность обучения будем характеризовать показателем NMSE (Normalized Mean Square Error):

$$NMSE = 10 \lg \left( \frac{|\overline{\varepsilon}|^2}{|\overline{x}|^2} \right).$$

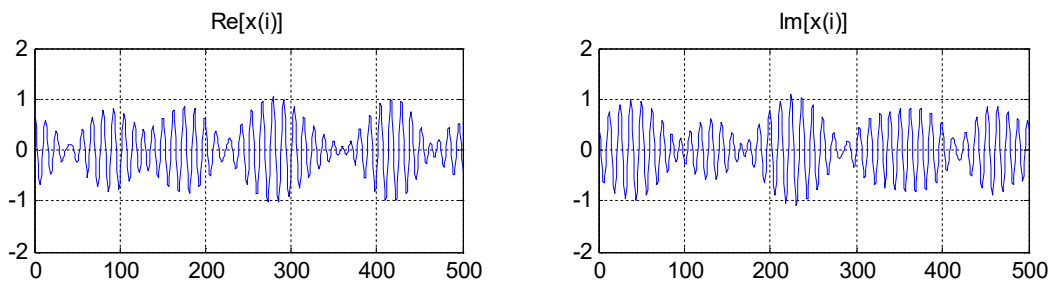


Рис. 3.

Результаты экспериментального исследования представлены в таблице 1. Последовательный режим обучения носит стохастический характер, при котором разные реализации обучения при одних и тех же параметрах сети приводят к отличающимся результатам. В табл. 1 представлена точность тестирования, усредненная по 10 реализациям. Для обучения нейронной сети использовалась 40000 комплексных отсчетов входного и выходного сигналов усилителя. Тестирование обученной сети проводилось на следующих 10000 отсчетов.

Таблица 1. Результаты экспериментального исследования

m	NMSE, дБ							
	r = 3	r = 4	r = 5	r = 6	r = 8	r = 10	r = 12	r = 14
4	-27,0	-27,1	-27,3	-27,4	-27,5	-27,6	-26,8	-26,6
6	-31,0	-31,2	-31,3	-31,4	-31,5	-31,6	-31,5	-30,6
8	-31,8	-32,2	-32,3	-32,4	-32,9	-33,1	-32,6	-32,4
10	-32,1	-32,3	-32,4	-32,8	-33,0	-33,2	-32,9	-32,8
12	-32,3	-32,7	-32,4	-33,1	-33,8	-34,1	-33,5	-33,2
14	-32,4	-32,8	-32,7	-33,2	-33,9	-34,3	-33,7	-33,3
16	-32,5	-32,9	-33,0	-33,3	-34,1	-34,5	-33,8	-33,5
20	-32,5	-33,0	-33,1	-33,3	-34,1	-34,5	-33,9	-33,5



Проведем анализ полученных результатов для процедуры обучения нейронной сети. Для большей наглядности часть результатов оформлена в виде графиков (рис. 4).

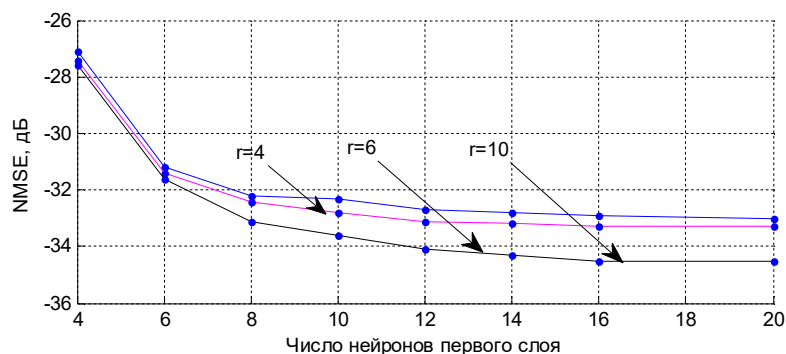


Рис. 4.

Как и следовало ожидать, точность обучения нейронной сети повышается с увеличением числа нейронов первого слоя. Причем на начальном этапе увеличение числа нейронов с двух до десяти приводит к заметному повышению точности обучения. При дальнейшем увеличении числа нейронов эффективность обучения снижается. Наряду с показателем NMSE, качество тестирования можно оценить, анализируя сигнал ошибки тестирования  $\varepsilon(i) = x(i) - \hat{x}(i)$ . В качестве примера рассмотрим нейронную сеть с параметрами  $r = 4$ ,  $m = 6$ . На рисунке 5 приведены фрагменты вещественной и мнимой составляющих сигнала ошибки.

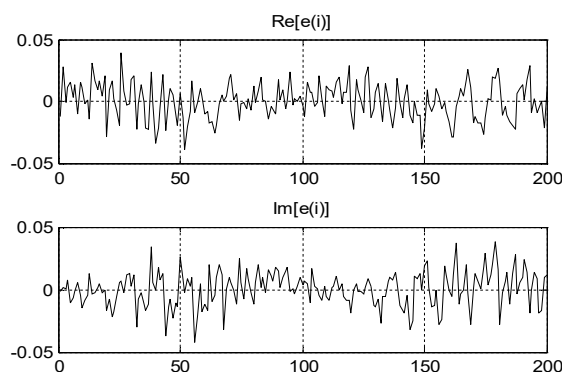


Рис. 5.

**Заключение.** Концепция построения комплексных нейронных сетей, предложенная в работе [2], использована в данной работе для построения инверсной модели объекта, на входе и выходе которого наблюдаются комплексные сигналы. Нейронная сеть показала свою работоспособность. Практическое применение разработанная нейронная сеть может найти в задаче предсказания, когда нейронная сеть ставится перед нелинейным объектом с целью компенсации его нелинейных эффектов.

### Библиографический список

1. Прокис Дж. Цифровая связь. М.: Радио и связь, 2000.
2. Кузнецов В.П. Комплексная нейронная сеть // Цифровая обработка сигналов, 2023, №3, с. 32-36.
3. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. М.: Финансы и статистика, 2004.
4. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание. М.: Изд. дом «Вильямс», 2008.

**СЕКЦИЯ «ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ»**

УДК 519.17; ГРНТИ 27.45.17

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯЗЫКА SPARQL В РЕАЛИЗАЦИИ  
ГРАФОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ  
ДЛЯ ПОИСКА КРАТЧАЙШИХ ПУТЕЙ В ГРАФЕ****В.Н. Дубинин\*, М.А. Ручкин\*, А.В. Дубинин\*, Л.П. Климкина\*\****\* Пензенский государственный университет,  
Россия, Пенза, dubinin.victor@gmail.com**\*\* Пензенский государственный аграрный университет,  
Россия, Пенза, ludmila.klimkina@gmail.com*

*Аннотация.* Рассматривается реализация графовой грамматики для поиска кратчайших путей в графе, представленной в составе примеров системы AGG, с использованием языка SPARQL. Даются методические указания по кодированию правил графовых трансформаций на данном языке. Представленная работа может использоваться в качестве начального шага в создании распределенного инструментального программного средства для трансформации графов на основе онтологий и языка SPARQL.

*Ключевые слова:* онтология, атрибутные графы, графовые грамматики, графовые трансформации, SPARQL, AGG.

**USING THE SPARQL LANGUAGE IN THE IMPLEMENTATION  
OF A GRAPHODYNAMIC MODEL  
FOR SEARCHING SHORTEST PATHS IN GRAPHS****V.N. Dubinin\*, M.A. Ruchkin \*, A.V. Dubinin\*, L.P. Klimkina\*\****\* Penza State University,  
Russia, Penza, dubinin.victor@gmail.com**\*\* Penza State Agricultural University,  
Russia, Penza, ludmila.klimkina@gmail.com*

*Abstract.* The implementation of a graph grammar for finding the shortest paths in a graph, presented as part of the examples of the AGG system, using the SPARQL language is considered. Guidelines are given for coding the rules of graph transformations in the SPARQL language. This work can be used as an initial step in creating a distributed software tool for transforming graphs based on ontologies and the SPARQL language.

*Keywords:* ontology, attribute graphs, graph grammars, graph transformations, SPARQL, AGG.

**Введение**

Теория графов является одним из фундаментов многих направлений научных исследований, включая информационные и телекоммуникационные системы, системы автоматизированного проектирования, системы автоматизации производства, интеллектуальные системы и т.д. С использованием графовых моделей можно описать структуру практически любой сложной системы. Недостатком таким моделей является их статичность, что не позволяет представлять динамические процессы, протекающие в системах. Для преодоления этого недостатка были разработаны графовые модели, способные модифицироваться (в дальнейшем будем называть их графодинамическими моделями). В первую очередь это графовые грамматики. Первая работа, посвященная графовым грамматикам, появилась в 1969 году [1]. Графовые грамматики и системы перезаписи графов в последующие годы завоевали большое распространение [2]. В работе [3] изложен альтернативный подход к графодинамике. В последнее время был разработан ряд инструментальных программных систем для поддержки графовых трансформаций и графовых грамматик, в числе которых AGG, GReTL, GrGEN, Viatra2, GROOVE, MOLLA, QVTR-XSLT [4]. В дальнейшем будем использовать систему AGG в качестве референсной системы. Данная система представляет классическую систему трансформации типизированных атрибутных графов (ТАГ), в которой реализован алгебраи-

ческий подход [5]. Система реализована на языке Java. В дистрибутиве системы имеется несколько демонстрационных примеров.

Среди новых технологических информационных платформ можно выделить семантический Веб [6]. В его основе лежит RDF-модель данных, которая, по сути, является графовой моделью [7]. RDF-хранилище данных представляет ориентированный граф, в котором вершинами являются субъекты и объекты, а рёбра отображают отношения. Для доступа к RDF-данным был разработан SPARQL - семантический язык запросов [8]. В 2013 году была представлена версия языка SPARQL 1.1, которая позволяла добавление и удаление триплетов в граф. В этом языке имеется встроенный мощный и эффективный механизм сопоставления графов. Все это делает использование языка SPARQL 1.1 весьма привлекательным для реализации систем трансформации графов в среде семантического Web. Таким образом, можно предположить, что использование новых информационных технологий на основе семантического Веб позволит эффективно реализовать системы трансформации графов и расширить область их применения.

В данной работе предлагается реализация графовой грамматики для поиска кратчайших путей в графе (пример Shortest Paths), представленной в примерах системы AGG [9], с использованием языка SPARQL 1.1.

### Описание примера Shortest Path

Суть задачи в примере Shortest Paths сводится к следующему – в заданном графе, описывающем города и дороги, их соединяющие, необходимо найти кратчайший путь из начального города в конечный.

В графе используется два типа узлов: City (города) и State (состояние). Для обозначения обоих типов используется прямоугольник черного цвета. Узлы типа City взвешены атрибутом *n* (имя узла). Этот атрибут не принимает участие в вычислениях. Единственный узел типа State имеет атрибут *max*, который используется для хранения максимального (на данный момент) расстояния. Используется пять типов дуг: два типа именованные, остальные различаются только цветом и стилем. Дуги типа Start и Goal отмечают начальный и конечный узлы, соответственно. Сплошные черные дуги определяют дороги, они взвешены атрибутом *d* (расстояние между городами). Пунктирная синяя дуга определяет суммарное расстояние от начального узла до узла-приемника дуги. Точечная красная дуга представляет участок найденного минимального пути, она также взвешена атрибутом *d*.

Соответствующая графовая грамматика включает восемь правил графовых трансформаций (ПГТ): [0]start, [1]expandStart, [2]expand, [2]expandMore, [2]setMax, [3]showRoad, [3]showRoad1, [4]removeExpand. Число в квадратных скобках показывает уровень правила. Каждое ПГТ имеет левую и правую части. Кроме того, правило может содержать NAC-и AC-условия. Отрицательное условие применения (NAC-условие) запрещает использование правила. Условие применимости (AC-условие) является дополнительным разрешающим условием логического типа, определенным на множестве атрибутов узлов и дуг графа. NAC-условие представляется в виде графа (это своего рода запрещенная фигура).

Следует отметить, что AGG-проект ShortestPath.ggx не обладает стабильностью во время выполнения, поскольку при каждом новом запуске в качестве начального и конечного узлов выбираются узлы по случайному принципу. Поэтому данный AGG-проект был модифицирован, а именно, в исходном графе была явно указана начальная вершин E и конечная вершина H. Первое правило [0]start, назначающее начальную и конечную вершину, было удалено.

В процессе графовых трансформаций начальный граф поэтапно, через ряд промежуточных графов, преобразуется в конечный граф (рис. 1).

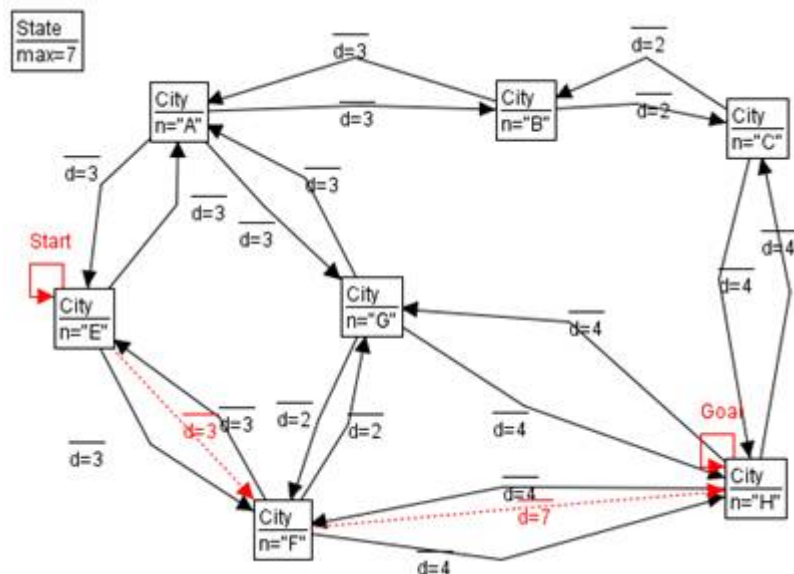


Рис. 1. Конечный граф, полученный в результате графовых трансформаций

В конечном графе будет присутствовать и найденный кратчайший путь (он показан красными точечными дугами). Статистика по числу выполнения правил приведена ниже: expandStart -2, expand -8, expandMore -0, setMax -1, showRoad -1, showRoad1 -1, removeExpand -8.

В примере Shortest Paths используется «послойная» (layered) модель выполнения правил, в соответствии с которой сначала выполняются правила с наименьшим номером уровня. Таким образом, уровень 0 является самым приоритетным. Каждое правило в примере выполняется до тех пор, пока оно применимо (иначе, разрешено).

### Онтология атрибутивных графов

Первым шагом в реализации графо-трансформационной системы на основе SPARQL является разработка онтологического представления ТАГ, используемых в данном конкретном примере. Характерной особенностью онтологии является то, что отдельно не выделяются и не определяются типы узлов, типы дуг и типы атрибутов. Связь узла или дуги графа с соответствующим типом узла или дуги определяется через свойство по данным, с помощью которого указывается только имя типа (в виде строковых данных).

Более подробно следует остановиться на том, как определяется атрибут узла или дуги графа. Для его определения используется только свойство по данным. Данное свойство задает значение атрибута. При этом тип данных атрибута определяется в описании Range (области значений свойства). Имя атрибута задается следующим образом в имени свойства по данным: has\_attr\_<имя атрибута>. Таким образом, типизация в данной онтологии не используется явно. Все это позволяет значительно упростить онтологию ТАГ и сократить ее объем.

Классы онтологии:

Node – узлы (вершины) графа

Edge – направленные ребра (дуги) графа

Объектные свойства:

comes\_from – определяет узел-источник для дуги

comes\_to – определяет узел-приемник для дуги

Свойства по данным

has\_attr\_n – иметь значение вершинного атрибута n (строкового типа)

has\_attr\_d – иметь значение реберного атрибута d (целого типа)

has\_attr\_max – иметь значение вершинного атрибута max (целого типа)

has\_node\_type – иметь имя типа узла

has\_edge\_type – иметь имя типа дуги  
 Онтология ТАГ была сформирована в системе Protégé [10].

### Методика кодирования правил трансформации графов на языке SPARQL

Ниже приводится ряд положений данной методики.

Левая часть правила трансформации графов (ПТГ) вместе с NAC- и AC-условиями представляется в WHERE-предложении с вложенным подзапросом, а именно в виде следующей конструкции:

```
WHERE {
  SELECT <список параметров>
  WHERE {<граф левой части ПТГ>[<NAC-условия>][<AC-условия>]}
  LIMIT 1}
```

При этом <список параметров> есть список переменных, представляющих узлы и дуги графа (а также их атрибуты) из левой части ПТГ, участвующих в правой части ПТГ и, соответственно в DELETE- и INSERT-предложениях SPARQL Update-запросов.

Правая часть ПТГ представляется с помощью DELETE- и INSERT-предложений SPARQL Update-запросов. Предложение DELETE используется для удаления вершин и дуг графа, а предложение INSERT – для их создания. В совокупности конструкция DELETE-INSERT используется также для модификации значений атрибутов узлов и дуг графа.

Если один и тот же узел имеется как левой части ПТГ, так и в правой его части, то он представляется одной и той же переменной языка SPARQL. Создание такого узла не производится в SPARQL Update-запросе.

Если одна и та же дуга имеется как левой части ПТГ, так и в правой его части, то она представляется одной и той же переменной языка SPARQL. Создание такой дуги не производится в SPARQL Update-запросе.

Если некоторый узел имеется в правой части ПТГ, а в левой его нет, то производится его создание с помощью INSERT-предложения с использованием концепции пустого узла SPARQL.

Если некоторая дуга имеется в правой части правила ПТГ, а в левой ее нет, то производится ее создание с помощью INSERT-предложения с использованием концепции пустого узла SPARQL. Связывание вновь созданного индивида для дуги с окружением производится с использованием объектных свойств comes\_from и comes\_to.

Если в правиле ПТГ имеется NAC-условие, то оно представляется FILTER NOT EXISTS–предложением.

Если в правиле ПТГ имеется несколько NAC-условий, то они представляются конструкцией

```
FILTER NOT EXISTS {<графовый шаблон для запрещенного графа 1>}
FILTER NOT EXISTS {<графовый шаблон для запрещенного графа 2>}
```

...

```
FILTER NOT EXISTS {<графовый шаблон для запрещенного графа N>}
```

Арифметические выражения, определяющие изменение значений атрибутов узлов и дуг, представляются при помощи BIND-предложения.

Если в правиле ПТГ имеется AC-условие, то оно напрямую представляется FILTER–предложением.

При формировании шаблона графа левой части ПТГ надо указать, что все участвующие в нем вершины графа попарно различны. Это можно сделать при помощи предложений FILTER. Например, если используются три вершины, то можно написать:

```
FILTER (?c1 != ?c2)
FILTER (?c1 != ?c3)
FILTER (?c2 != ?c3)
```

### Пример кодирования правила на языке SPAQRL

Рассмотрим пример реализации на языке SPARQL простого трансформационного правила `expandStart`, определяющего минимальные расстояния для узлов, отстоящих от начального узла на одно ребро (рис. 2). Как видно из данного рисунка, правило включает левую часть (LHS), правую часть (RHS) и одно NAC-условие (изображено крайним левым графом на рисунке).

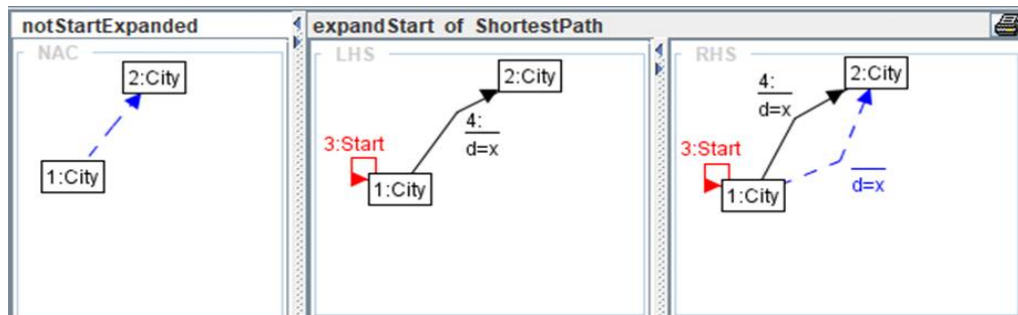


Рис. 2. Правило графовой трансформации `expandStart` (фрагмент скриншота AGG)

SPARQL Update-запрос представлен ниже:

```

PREFIX rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>
PREFIX xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#>
PREFIX : <URI онтологии графов>

INSERT {
  [] rdf:type :Edge;
  :has_edge_type "blue"^^xsd:string;
  :comes_from ?c1;
  :comes_to ?c2;
  :has_attr_d_value ?x}
WHERE {
  SELECT ?c1 ?c2 ?a3 ?a4 ?x
  WHERE {
    ?c1 rdf:type :Node.
    ?c1 :has_node_type "City"^^xsd:string.
    ?c2 rdf:type :Node.
    ?c2 :has_node_type "City"^^xsd:string.
    ?a3 rdf:type :Edge.
    ?a3 :has_edge_type "start"^^xsd:string.
    ?a3 :comes_from ?c1.
    ?a3 :comes_to ?c1.
    ?a4 rdf:type :Edge.
    ?a4 :has_edge_type "black"^^xsd:string.
    ?a4 :comes_from ?c1.
    ?a4 :comes_to ?c2.
    ?a4 :has_attr_d_value ?x.
  }
  FILTER (?c1 != ?c2)
  # NAC-условие
  FILTER NOT EXISTS {
    ?a rdf:type :Edge.
    ?a :has_edge_type "blue"^^xsd:string.
    ?a :comes_from ?c1.
  }
}

```

```
?a :comes_to ?c2}
}
LIMIT 1
}
```

SPARQL Update-запросы выполнялись в ручном режиме с использованием Web-интерфейса SPARQL-сервера Apache Jena Fuseki [11] с учетом «послойной» модели выполнения правил.

В результате выполненной работы можно констатировать следующее:

1) кратчайший путь, найденный с помощью SPARQL Update -запросов, соответствует кратчайшему пути, найденному системой AGG;

2) разработанная система SPARQL Update-запросов правильно реализует систему трансформации графов для поиска кратчайших путей.

В заключение следует отметить, что в представленном примере трансформации графов удалялись и добавлялись только дуги графа, но не узлы. Поэтому проблемы, связанные с модификацией узлов, не рассматривались. Представленная работа будет использоваться в дальнейшем при создании распределенной инструментальной графо-трансформационной системы на основе онтологий и языка SPARQL.

### Библиографический список

1. Pfaltz J.L., Rosenfeld A. Web grammars // Proc. Int. Joint Conf. Art. Intelligence, Washington, 1969. – P. 609-619.
2. Handbook of Graph Grammars and Computing by Graph Transformations / G. Rozenberg (ed.) // World Scientific. – 1997. – Vol. 1. – 553 p.
3. Айзерман М.А., Гусев Л.А., Смирнова И.М., Петров С.В. Динамический подход к анализу структур, описываемых графами (Основы графодинамики) // Автоматика и телемеханика. – 1977. – №7. – С. 135-151. – №9. – С. 123–136.
4. Jakumeit E., Buchwald S., Wagelaar D. , etc. A survey and comparison of transformation tools based on the transformation tool contest // Science of Computer Programming, N 85. – 2014. – P. 41–99.
5. Taenzer G. AGG: A Tool Environment for Algebraic Graph Transformation // Lecture Notes in Computer Science. – 2000. – Vol. 1779. – P. 481–490.
6. Allemang D., Hendler J. Semantic Web for the Working Ontologist. Modeling in RDF, RDFS and OWL. – Morgan Kaufmann Publishers, 2008. –349 p.
7. Горшков С. Введение в онтологическое моделирование. – ТриинДата, 2016. – 166 с.
8. DuCharme V. Learning SPARQL: Querying and Updating with SPARQL 1.1. – O'Reilly, 2011. – 237 p.
9. AGG [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://tfs.cs.tu-berlin.de/agg>.
10. Protégé [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://protege.stanford.edu>.
11. Apache Jena Fuseki [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://jena.apache.org/documentation/fuseki2/>.

УДК 681.518.3; ГРНТИ 50.45.29

## ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ В ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЕ ДЛЯ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ ВРАЩАЮЩИХСЯ УЗЛОВ И МЕХАНИЗМОВ

**В.В. Карасев, А.А. Михеев**

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина  
Российская Федерация, Рязань, [maa0312@yandex.ru](mailto:maa0312@yandex.ru)*

*Аннотация.* В данной работе рассмотрены варианты одноимпульсного возбуждения индуктивно-связанных контуров, используемых в качестве канала обмена данными информационно-управляющей системы для ресурсных испытаний вращающихся узлов и механизмов.

*Ключевые слова:* индуктивно-связанные контуры, ток возбуждения, вращающаяся аппаратура, канал обмена данными

## DATA TRANSMISSION IN THE INFORMATION MANAGEMENT SYSTEM FOR RESOURCE TESTING OF ROTATING ASSEMBLIES AND MECHANISMS

V.V. Karasev, A.A. Mikheev

Ryazan State Radio Engineering University named V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, maa0312@yandex.ru

*The summary.* In this paper, variants of single-pulse excitation of inductively coupled circuits used as a data exchange channel of an information control system for resource testing of rotating assemblies and mechanisms are considered.

*Keywords:* inductively coupled circuits, excitation current, rotating equipment, data exchange channel

### Введение

Задача обмена данными между вращающейся частью информационно-управляющей системы и стационарной аппаратурой возникает во многих областях техники (авиастроение, автомобилестроение, моторостроение и т.п.). Особую актуальность эта задача приобретает при ресурсных испытаниях вращающихся узлов и механизмов. Над ее решением работают как в нашей стране, так и за рубежом.

Например, в телеметрической системе для дорожных испытаний автомобильных трансмиссий [1] данные передаются по каналу Bluetooth с помощью адаптера DBT-120 фирмы D-Link. Однако применение этой системы для ресурсных испытаний, продолжающихся сотни и тысячи часов, затруднительно, т.к. питание вращающейся аппаратуры осуществляется от автономного источника питания гальванического типа (батарейки). Это ограничивает время непрерывной работы аппаратуры 40 часами.

Из отечественных разработчиков необходимо еще отметить группу компаний «Мера». Созданный ими комплекс МІС-1500 [2] относится к классу радиотелеметрических систем, предназначенных для измерения деформации, температуры, вибрации на вращающихся частях турбоагрегатов и передачи данных на неподвижную приёмную часть системы для регистрации и последующей обработки. На вращающейся части размещается от 1 до 8 модулей-передатчиков МІ-1500. Передатчики работают на частотах 1.2 ... 1.8 ГГц. Однако, в целом ряде случаев при проведении испытаний новой техники не допускается радиоизлучения в эфир. Поэтому область применения комплекса МІС-1500 ограничена такими испытаниями, при которых указанных требований нет.

Среди устройств зарубежных производителей можно выделить аппаратуру, производимую фирмой Manner, ФРГ (полное название – Manner Sensortelemetrie GmbH) [3]. В ней реализован один из вариантов индуктивной связи между вращающейся и стационарной аппаратурой (рис. 1).

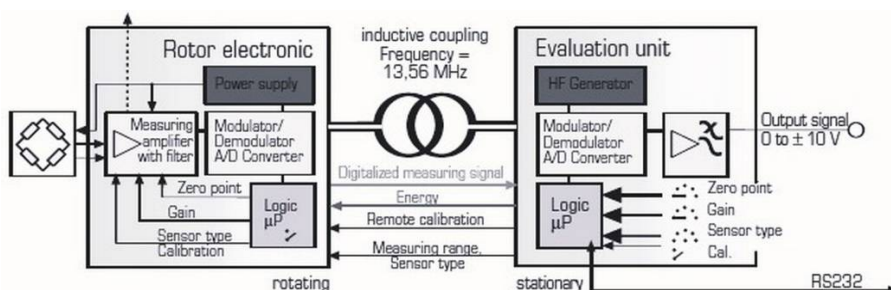


Рис. 1. Структура аппаратуры фирмы Manner

Канал передачи данных представляет собой одновитковую вращающуюся антенну и зафиксированный над ней с помощью кронштейна приемо-передатчик. Приемник, находящийся в стационарной части системы (Evaluation unit), передает через названный элемент связи необходимое питающее напряжение на вращающуюся аппаратуру (Rotor electronic), а



также сигналы калибровки (Remote calibration) и получает от нее данные о состоянии элементов конструкции подвижной части по этому же радиоканалу.

Как и в комплексе МІС-1500, при работе такой аппаратуры возможно радиоизлучение в эфир, что также ограничивает области применения этого оборудования.

### Индуктивно-связанные контуры как канал обмена данными

Идея использования индуктивной связи между вращающейся и стационарной аппаратурой при разработке измерительных систем для вращающихся узлов и механизмов разрабатывалась в Рязанском радиотехническом институте с начала 70-х годов XX века. Результаты проведенных исследований и разработок были обобщены в монографии [4]. За прошедшее время исследования по тематике сбора и передачи информации с вращающихся объектов продолжались. Получены новые результаты, касающиеся построения двунаправленного канала передачи информации на основе индуктивно связанных контуров (ИСК), в частности представление символов цифрового кода, содержащего информацию о контролируемом параметре, специальными сигналами различной формы с целью повышения быстродействия передачи и помехозащищенности передаваемых сигналов.

Были рассмотрены следующие направления:

1) обеспечение повышения скорости отклика ИСК на возбуждающие воздействия, что позволяет увеличить пропускную способность канала связи;

2) обеспечение надежного выделения на приемной стороне передаваемых символов кода данных, что важно для формирования адекватных управляющих сигналов, обеспечивающих заданный режим работы объекта при длительных ресурсных испытаниях.

Электрическая схема симметричного канала передачи данных на основе индуктивно-связанных контуров приведена на рисунке 2.

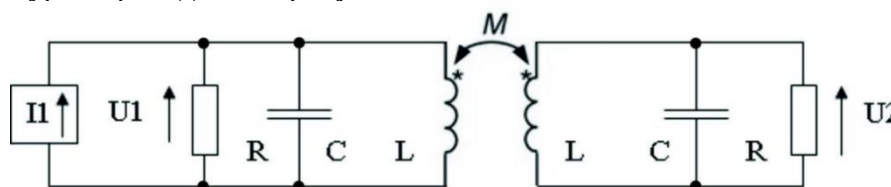


Рис. 2. Индуктивно связанные контуры с токовым возбуждением

Связь выходного напряжения  $U_2$  с входным токовым воздействием  $I_1$  можно описать операторным уравнением

$$I_1(s) = \frac{1-k^2}{kL\omega^2 s} \left[ s^4 + 2d\omega s^3 + \left( \frac{2}{1-k} + d^2 \right) \omega^2 s^2 + 2d \frac{\omega^3 s}{1-k^2} + \frac{\omega^4}{1+k^2} \right] U_2(s),$$

где  $k = M/L$  – коэффициент связи между контурами,

$M$  – взаимная индуктивность контуров,

$\omega = 1/\sqrt{LC}$  – частота собственных колебаний каждого контура,

$\rho = \sqrt{L/C}$  – волновое сопротивление каждого контура,

$d = \rho/R$  – затухание.

Решение характеристического уравнения (приравненное нулю выражение в квадратных скобках) дает следующие корни:

$$s_1 = -\frac{\omega}{2} \left( d - \sqrt{d^2 - \frac{4}{1+k}} \right), \quad s_2 = -\frac{\omega}{2} \left( d + \sqrt{d^2 - \frac{4}{1+k}} \right),$$

$$s_3 = -\frac{\omega}{2} \left( d - \sqrt{d^2 - \frac{4}{1-k}} \right), \quad s_4 = -\frac{\omega}{2} \left( d + \sqrt{d^2 - \frac{4}{1-k}} \right).$$

В зависимости от соотношения слагаемых в подкоренном выражении реакция ИСК на входное воздействие в четырех случаях будет иметь аperiодический характер, причем в одном из них при  $d^2 = 4/(1+k)$  процесс будет граничным, т.е. еще аperiодическим, но находящимся на границе с колебательным процессом. При  $d^2 < 4/(1+k)$  все корни становятся попарно комплексно сопряженными, и реакция ИСК на скачок тока становится колебательной, т.е. она содержит в своем составе затухающие колебания.

### Варианты возбуждения индуктивно-связанных контуров

Исследования реакции ИСК на одноимпульсные входные воздействия различной формы показали, что в аperiодическом режиме работы ИСК наиболее быстродействующим будет канал связи при экспоненциальном входном воздействии [5]. Вариант схемной реализации приведен на рисунке 3.

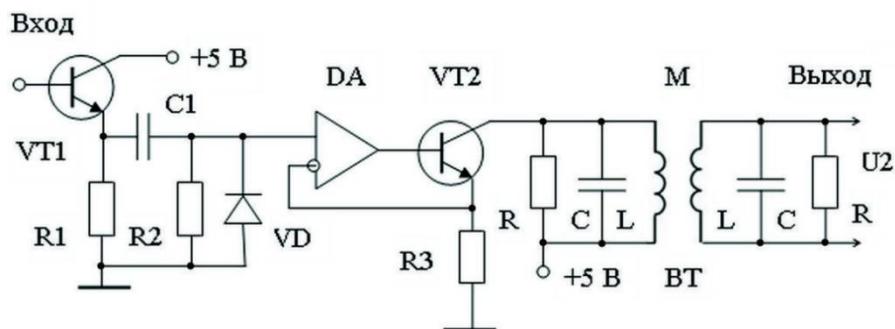


Рис. 3. Схема устройства передачи данных через воздушный зазор

Формирование экспоненциального импульса осуществляется дифференцирующей цепью  $C1R2$  с ограничением отрицательного импульса диодом  $VD$ . Источник тока возбуждения ИСК выполнен на операционном усилителе  $DA$ , токозадающем резисторе  $R3$  и выходном транзисторе  $VT2$ . Ток в коллекторной цепи  $VT2$ , к которой подключен первичный контур ИСК, повторяет форму сигнала на неинвертирующем входе операционного усилителя  $DA$ .

На рисунке 4 показан вид реакции ИСК ( $U_2$ ) на экспоненциальное воздействие.

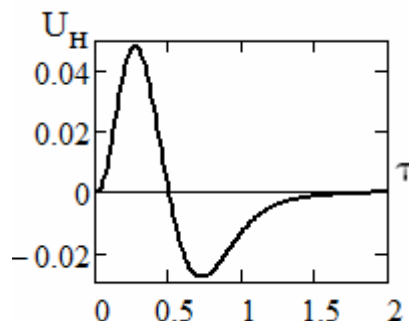


Рис. 4. Реакция ИСК на экспоненциальное возбуждение

Ось абсцисс соответствует относительному времени, ось ординат – относительной амплитуде. Относительная (нормированная) амплитуда определяется как  $U_n = U_p / I_0 \rho$ , где  $U_p$  – реальное значение амплитуды,  $I_0$  – амплитуда тока возбуждения первичной обмотки ИСК,  $\rho = \sqrt{L/C}$  – волновое сопротивление,  $L$  и  $C$  – индуктивность и емкость, образующие

контур. Нормирование времени  $t$  осуществляется относительно периода собственных колебаний контура  $\tau = t/(2\pi\sqrt{LC})$ .

Из рисунка 4 следует, что относительная длительность реакции ИСК на экспоненциальное воздействие  $\tau_e = 1.8$ , а относительная амплитуда  $U_{He} = 0.05$ . Так как реальное значение амплитуды на выходе ИСК определяется как  $U_p = U_H I_0 \rho$ , то для надежного восстановления символов данных ( $U_p \geq 1$  В) необходимо обеспечить достаточно большое значение  $I_0$  тока возбуждения первичного контура.

При работе ИСК в апериодическом режиме наибольшее значение амплитуды сигнала на выходе ИСК обеспечивается при возбуждении первичного контура импульсами тока прямоугольной формы. При этом относительная амплитуда достигает значения  $U_{Hi} = 0.15$ , несколько увеличивается относительная длительность  $\tau_i = 1.9$  (рис. 5).

Схема возбуждения ИСК прямоугольными импульсами аналогична схеме на рис. 3, в которой исключены элементы дифференцирующей цепи  $C1, R2, VD$ , а выход эмиттерного повторителя ( $VT1$ ) подключен непосредственно к неинвертирующему входу операционного усилителя  $DA2$ .

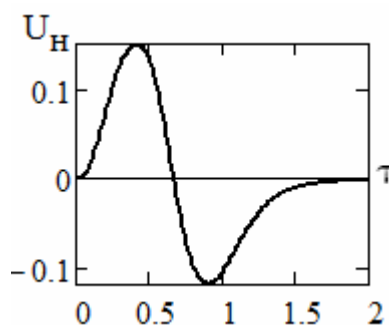


Рис. 5. Реакция ИСК на возбуждение импульсами прямоугольной формы.

Исследования зависимости амплитуды реакции ИСК от длительности возбуждающих импульсов показали, что оптимальной является относительная длительность  $\tau_{BX} = 0.45$ . Графики, представленные на рис. 4 и рис. 5 получены при этом значении  $\tau_{BX}$  и коэффициенте связи между контурами  $k = 0.5$ .

### Примеры расчета индуктивно-связанных контуров

В качестве примера приведем результаты расчетов параметров ИСК при возбуждении экспоненциальными и прямоугольными импульсами тока. Для расчетов использованы приведенные выше относительные параметры ИСК.

Пусть на выходе ИСК, работающим в критическом режиме, необходимо получить сигнал с амплитудой  $U_p = 1$  В и длительностью  $\tau_{ВЫХ} = 1$  мкс. Зададим значения коэффициента связи  $k = 0.5$  и относительной длительности входного сигнала  $\tau_{ВХ} = 0.45$ . Выберем значение емкости в каждом контуре  $C = 200$  пФ, исходя из длины кабеля связи с неподвижной обмоткой воздушного трансформатора.

По известным значениям относительной длительности реакции ИСК при экспоненциальном возбуждении первичного контура  $\tau_e = 1.8$  и длительности реакции при возбуждении прямоугольными импульсами  $\tau_i = 1.9$  из (2) найдем значение индуктивности  $L$  для каждого из вариантов возбуждения так:  $L_e = 39$  мкГн,  $L_u = 35$  мкГн соответственно. По известным  $C$  и  $L$  определим соответствующие значения волнового сопротивления для каждого вида возбуждения:  $\rho_e = 442$  Ом,  $\rho_u = 418.8$  Ом. Зная  $k$  и  $\rho$ , рассчитаем значения сопротивления резисторов  $R$ , включаемых параллельно  $C$  и  $L$  для обеспечения критического режима работы ИСК:

$R = \frac{\rho\sqrt{1+k}}{2}$ . В соответствии с этим выражением получаем для разных видов возбуждающего сигнала  $R_e = 270.7$  Ом и  $R_u = 256.5$  Ом.

Из рисунков 4 и 5 следует, нормированные значения амплитуд составляют для ИСК с экспоненциальным возбуждением  $U_{He} = 0.05$ , для ИСК с возбуждением прямоугольными импульсами  $U_{Hu} = 0.15$ .

Из (1) найдем необходимую амплитуду тока возбуждения ИСК для каждого из вариантов:  $I_{0e} = 45$  мА и  $I_{0u} = 16$  мА.

Какой конкретно вариант возбуждения ИСК выбрать зависит от условий решаемой задачи.

Представленные возможности реализации канала передачи данных с вращающейся части аппаратуры на неподвижную удачно дополняются аналогичными решениями передачи команд в обратном направлении, а также вариантом передачи энергии питания вращающейся аппаратуры на основе третьей пары ИСК [4]. При этом конструктивное решение предполагает надежное экранирование трех пар катушек, исключаящее их взаимное влияние друг на друга. Таким образом, создаются предпосылки комплексного решения задачи ресурсных испытаний вращающихся узлов и механизмов.

### Библиографический список

1. Ярусов А., Тенюшко Т., Швец В. Телеметрическая система для дорожных испытаний автомобильных трансмиссий // Современные технологии автоматизации. 2008. № 3. С. 66-73.
2. Телеметрическая система MIC-1500. <http://nppmera.ru/assets/files/documentation/MIC-1500sm.pdf>. (Дата обращения 12.11.2023).
3. Radio Sensortelemetry (Eng). URL: <http://manner-sensortelemetrie.ru/dokumentaciya/> (Дата обращения 21.06.2023).
4. Карасев В.В. Измерительные системы для вращающихся узлов и механизмов / В.В. Карасев, А.А. Михеев, Г.И. Нечаев, под редакцией Г.И. Нечаева. – М.: Энергоатомиздат, 1996. –176 с.
5. Зилотова М.А., Карасев В.В., Николаева А.В. Способ передачи данных через воздушный зазор и устройство для его осуществления. Патент РФ № 2565527. Опубликовано: 20.10.2015. Бюл. № 29.

УДК 004.413; ГРНТИ 20.51.17

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ И ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

А.Ю. Баранов, А.В. Маркин

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань

*Аннотация.* В статье рассматриваются процессы взаимодействия служб технической поддержки с пользователями информационных систем, поднимается проблема поддержки пользователей. Дается определение процессу поддержки пользователей, рассматриваются его виды и особенности.

*Ключевые слова:* информационная система, информационные процессы, поддержка пользователей, интеллектуальное взаимодействие, техническая поддержка, искусственный интеллект.

## RESEARCH OF THE PROCESSES OF INTELLIGENT AND FUNCTIONAL SUPPORT OF USER INFORMATION SYSTEMS

A.Yu. Baranov, A.V. Markin

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russian Federation, Ryazan

*Annotation.* The article discusses the processes of interaction between technical support services and users of information systems and raises the problem of user support. A definition is given to the user support process, its types and features are discussed.

*Key words:* information system, information processes, user support, intelligent interaction, technical support, artificial intelligence.

### Цель работы

Целью работы является исследование процессов интеллектуальной и функциональной поддержки пользователей информационных систем.

### Введение

Сегодня эксплуатируется множество информационных систем (ИС), находящихся на самом длительном этапе жизненного цикла – этапе сопровождения. При желании сохранять актуальность системы её необходимо постоянно поддерживать: добавлять новый функционал, выпуская обновления, поддерживать связь с пользователями системы, устранять ошибки и недоработки. На этом этапе ключевую роль в жизни системы играют именно пользователи. Из необходимости поддерживать пользователей возникает проблема организации этого процесса. В традиционном подходе этими вопросами занимаются сотрудники служб технической поддержки. Их основными задачами являются: общение с пользователями системы, сбор обратной связи и формирование целевых требований разработчикам системы, поддержка пользователей в вопросах эксплуатации. Как раз для увеличения производительности служб технической поддержки и появилась тенденция автоматизировать этот процесс.

Автоматизация процесса поддержки пользователей подразумевает под собой создание системы, которая сможет получать вопросы от пользователей, обрабатывать их и формировать на них свой ответ. Конечно, система не сможет подойти к вопросу так же гибко как человек-специалист, но к этому сейчас активно стремятся все ведущие в этой области разработки. Сам процесс общения пользователей с такой системой можно назвать интеллектуальным взаимодействием так как система представляет собой некий «искусственный интеллект», пусть и достаточно примитивный, который пытается распознать запросы человека и сформировать на них свои ответы.

Помимо процессов интеллектуального взаимодействия, в системах поддержки активно продвигается и функциональное взаимодействие. Функциональное взаимодействие позволяет оказывать услуги через интерфейс системы поддержки. Такой подход очень популярен и на данный момент реализуется во всех лидирующих в этой области разработках.

Задача автоматизации процесса поддержки пользователей информационных систем является актуальной. Уже существуют различные решения этой задачи. Многие крупные IT-компании инвестируют большое количество ресурсов для разработки подобных систем. Например, разработка «Маруси» – многофункционального голосового помощника (одной из разновидностей интеллектуальных систем поддержки) Mail.ru group, по некоторым оценкам, обошлась компании в 2 млн. долларов [1]. И это лишь один пример подобной системы [2].

Сегодня практически любая компания, которая сопровождает какой-либо программный продукт, нуждается в такой системе. Конечно, не все компании могут позволить себе выделить такое количество ресурсов на разработку, поэтому существуют гораздо более простые, быстрые и дешёвые решения этой задачи [3].

В статье также описываются некоторые существующие подходы к решению задачи поддержки пользователей информационных систем, оценены их преимущества и недостатки.

### Анализ проблемы поддержки пользователей ИС

Чтобы соответствовать современным тенденциям, разработчикам информационных систем необходимо постоянно модернизировать свои системы. Любой выпущенный программный продукт, переживает все стадии жизненного цикла программного обеспечения (ПО), а как известно, самым длительным этапом жизненного цикла является этап сопровождения. Весь этап сопровождения можно представить в виде спирали (рис. 1), где на каждой новой ветви вырабатываются новые требования к системе, производится их анализ, проектирование, реализация и тестирование, что в свою очередь приводит к выпуску новой версии поддерживаемого ПО. После чего, перед программным обеспечением возникают новые требования. И так будет продолжаться до того момента, пока поддержка существующей системы не станет более накладной чем разработка новой, решающей аналогичные задачи [4].

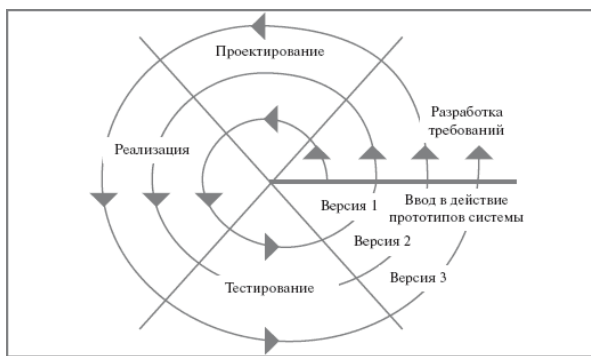


Рис. 1. Спиралевидная модель этапа сопровождения ПО

Чаще всего с программным обеспечением работают пользователи, которым на протяжении всего этапа сопровождения необходимо оказывать поддержку в использовании системы. Причиной этому становится, во-первых, выпуск обновлений, ведущий за собой добавление нового функционала, во-вторых, постоянно изменяющаяся целевая аудитория пользователей, которая работает с системой. Новым пользователям нужно как-то помогать знакомиться с системой, обучать их работе с ней. Из всех этих факторов вытекает проблема поддержки пользователей информационных систем.

Поддержка пользователей необходима прежде всего для того, чтобы сами пользователи могли работать с системой. Если не осуществлять такую поддержку, то работать с системой смогут лишь только разработчики этой системы, такой программный продукт заранее обречён на провал. Всё это приводит к тому, что даже небольшой компании, сопровождающей систему, необходимо иметь специалистов технической поддержки, которые будут работать с пользователями, отвечать на их вопросы, показывать и обучать их работе с системой. Специалист не всегда имеет возможность быстро помочь тем или иным пользователям, даже если речь идёт о простом типовом вопросе. Исходя из этого возникает потребность автоматизировать эти процессы работы с пользователями.

В качестве способа решения задачи автоматизации процесса поддержки пользователей может являться разработка системы, которая в автоматическом режиме сможет отвечать на вопросы пользователей. Примеры таких систем уже существуют, и на данный момент, это направление разработки активно развивается. Уже существует множество решений проблемы автоматизации поддержки пользователей путём разработки системы поддержки.

## Существующие решения систем поддержки пользователей

Проблема поддержки пользователей не нова, поэтому на данный момент уже существуют различные способы её решения. Все они не универсальны, имеют свои сильные и слабые стороны, поэтому перед разработкой такой системы необходимо тщательно проанализировать поставленную задачу, оценить материальные и временные ограничения.

Общую классификацию систем поддержки пользователей можно провести следующим образом (рис. 2).

Все системы поддержки пользователей, по возможности получения ответа без специалиста, можно разделить на две группы. Системы, в которых имеется эта возможность и системы, которые без специалиста предоставить ответ пользователю не могут. Ко вторым обычно относят различные каналы связи, объединяющие пользователя и сотрудника технической поддержки. Это может быть чат, сервис по формированию заявок или даже обычная телефонная линия. Здесь решающим фактором будет являться именно то, что на другом конце находится человек-специалист, который и отвечает на вопрос пользователя.

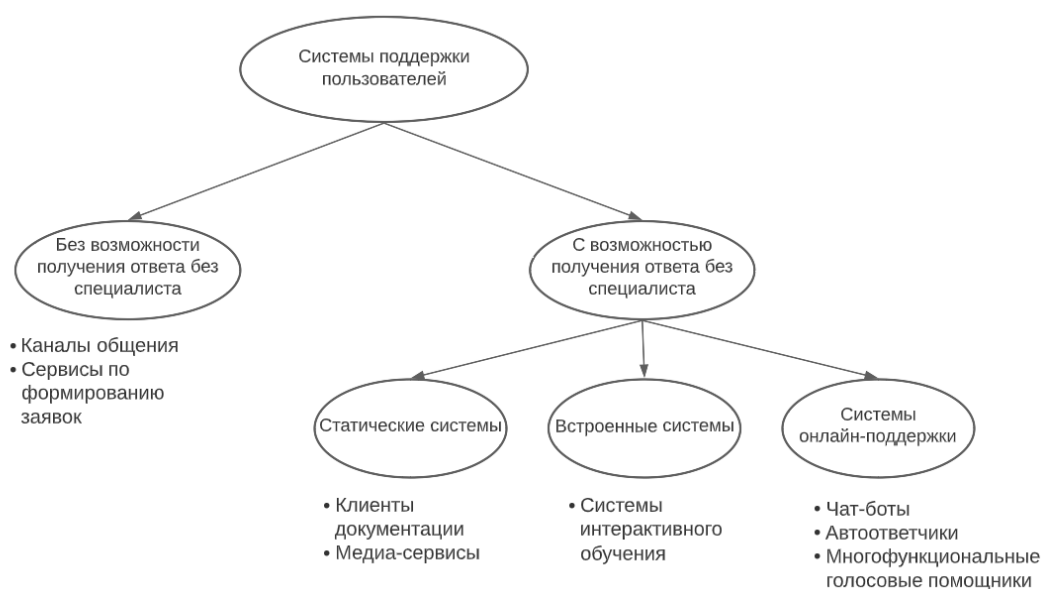


Рис. 2. Классификация систем поддержки пользователей

Системы, где получение ответа возможно без участия специалиста можно разделить на три категории: статические, встроенные и наиболее автоматизированный тип – системы онлайн-поддержки. Статические системы представляют собой большое хранилище информации, в котором пользователь сам ищет для себя ответ. Примерами таких систем являются электронные библиотеки, клиенты документации, различные медиа-сервисы, видео-хостинги и т.д. Встроенные системы представляют собой набор подсказок или установленных действий, которые демонстрирует программа, чтобы помочь пользователю сориентироваться в программном приложении. Такие системы, в основном, предназначены для стартового обучения пользователя по работе с приложением, но абсолютно не гибки т.к. не позволяют задать им свой вопрос. Третий, наиболее автоматизированный тип систем – системы онлайн-поддержки. Эти системы характеризуются интерактивным взаимодействием с пользователем в режиме реального времени (онлайн). Пользователь в любой момент задаёт такой системе свой вопрос, а система ему отвечает. К таким системам относят чат-ботов, если речь идёт о текстовом взаимодействии, автоответчики, если о голосовом, и комбинированный и наиболее продвинутый тип систем – многофункциональный голосовой помощник. Следует рас-

смотреть наиболее популярные подходы и решения среди встроенных систем и систем онлайн-поддержки.

Система интерактивного обучения. Пользователь, первый раз заходя в какой-либо программный продукт, видит незнакомый для себя интерфейс. В течение некоторого времени он пытается разобраться как работать с программой, а если у него это не получится, то он либо обращается за помощью, либо вовсе выходит из неё. Система интерактивного обучения упрощает именно этот этап – этап знакомства пользователя с программой. Новый пользователь, заходя в программу, видит набор последовательных сигналов, которые помогают ему сориентироваться в интерфейсе, а иногда даже совершить простую последовательность действий для проведения какой-нибудь типовой операции.

Сегодня такой подход активно используется при разработке мобильных приложений. Например, систему интерактивного обучения демонстрирует мобильное приложение Госуслуги. После выхода нового обновления, в приложении значительно изменился интерфейс, и новая система призвана познакомить пользователя с ним (рис. 3) [5].

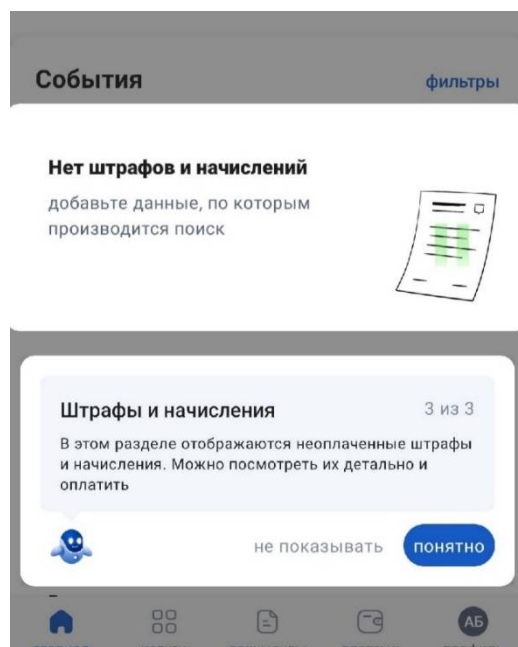


Рис. 3. Система интерактивного обучения в мобильном приложении Госуслуги

Обучение представляет собой всплывающие окна с текстом, которые фокусируют внимание пользователя на различных объектах интерфейса. В течение пары минут пользователь уже ознакомлен с основными разделами приложения, и ему становится гораздо проще дальше взаимодействовать с ним. Также, если пользователь уверен в том, что ему не нужен этот этап обучения, он может просто пропустить его нажав соответствующую кнопку.

Главным преимуществом такой системы является то, что пользователю не нужно куда-либо обращаться за помощью, ему просто необходимо установить программу, осуществить вход, и далее система уже готова помочь ему. Из недостатков можно выделить, во-первых, невозможность предусмотреть обучение для всех функциональных возможностей программы, их может быть слишком много, а пользователю некоторые функции могут быть и не нужны вовсе. Во-вторых, такая система абсолютно не гибкая. Есть установленный алгоритм в виде последовательности действий, и все пользователи, желающие пройти обучение, будут видеть одну и ту же последовательность, вне зависимости от того, понятен каждый из шагов какому-то конкретному пользователю или нет. Такая система не позволяет задать ей вопрос, она просто демонстрирует типовой пример.



Виртуальный голосовой помощник. Виртуальный голосовой помощник – достаточно универсальный и многозадачный тип систем поддержки пользователей. В основе такого помощника лежит нейронная сеть, которая обучаясь со временем, общается с пользователями и подбирает всё более и более подходящие ответы. Помимо того, что с помощником можно общаться через текстовый чат на экране, он поддерживает и голосовое общение. Система голосового помощника может, как воспринимать речь человека, задающего вопрос, так и синтезировать голосовой ответ. В качестве примера голосового помощника можно привести систему Алиса компании Яндекс (рис. 4) [6].

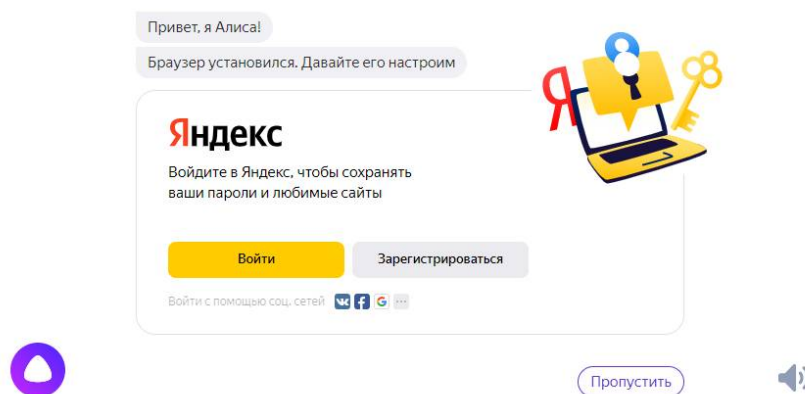


Рис. 4. Голосовой помощник Яндекс Алиса

Преимущества такой системы состоят из максимальной гибкости, как и в способах общения – текст или голос, так и в индивидуальном подходе к каждому пользователю за счёт опыта нейронной сети. Спектр задач виртуальных помощников не ограничивается получением на заданные вопросы типовых ответов или же демонстрации установленной последовательности действий. Главный недостаток такой системы вытекает из её характеристик – высокая стоимость разработки и сопровождения. В основном, подобные системы могут позволить себе только крупные IT-компании, например, Яндекс, Сбер или Google. Они имеют множество сервисов и услуг, а виртуальный помощник активно помогает пользователю в них сориентироваться. Примерами таких систем на рынке могут служить виртуальные помощники вышеупомянутых крупных компаний Яндекс Алиса, Сбер Салют, Google Assistant и др. [7, 8].

Чат-бот. Чат-бота можно классифицировать как промежуточное звено между предыдущими двумя способами. Он является более гибким решением, чем система интерактивного обучения, позволяя пользователю задавать ему вопросы, но в то же время уступает виртуальному помощнику в спектре решаемых задач.

В качестве примера можно привести чат-бота, который расположен на официальном сайте РГМЭК. Здесь чат-бот используется в качестве консультанта для пользователей, его основной функцией является помощь пользователю чётко сформулировать свой вопрос для последующего обращения к сотруднику технической поддержки (рис. 5) [9].

Оценка такого подхода также лежит где-то посередине: более гибкая структура в сравнении с интерактивной системой обучения; более низкая стоимость разработки в сравнении с полноценным виртуальным помощником, но на данный момент, чат-бот является наиболее популярным подходом в области автоматизированной поддержки пользователей. Практикуется подход, когда бот пытается ответить пользователю на его вопрос, но в случае, если бот не справляется со своей задачей, он перенаправляет пользователя к сотруднику технической поддержки, который уже в индивидуальном порядке помогает пользователю.

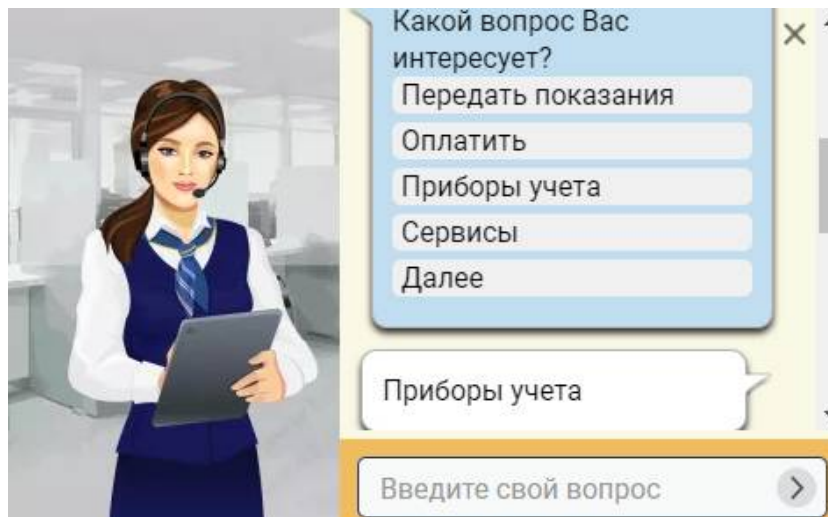


Рис. 5. Чат-бот «Консультант РГМЭК»

### Анализ процессов поддержки пользователей информационных систем

Чтобы перейти к разработке собственной системы поддержки пользователей информационных систем необходимо рассмотреть процессы поддержки пользователей. Под поддержкой пользователей информационных систем принято понимать взаимодействие пользователя с сервисами или службами технической поддержки, в результате которого пользователь стремится получить желаемую информацию или услугу. Поддержку пользователей информационных систем принято подразделять на две категории: интеллектуальную и функциональную поддержки (рис. 6).



Рис. 6. Виды поддержки пользователей

Под интеллектуальной поддержкой подразумевается интеллектуальное взаимодействие, общение с пользователем, формирование ответов на его вопросы и сбор статистики или обратной связи. Под функциональной поддержкой понимается оказание пользователю типизированных бизнес-услуг не через основной для этой услуги пользовательский интерфейс, а через интерфейс системы поддержки.

### Интеллектуальная поддержка

Основной задачей интеллектуальной поддержки является общение с человеком, а главной проблемой при разработке любой системы, которая общается с человеком является возможность этой системы распознавать человеческую речь, вне зависимости от того текстовое это или голосовое сообщение. Эту задачу решают лингвистические процессоры. Лингвистический процессор представляет собой подсистему, которая реализует формальную лингвистическую модель, тем самым позволяя себе работать с естественным языком челове-

ка. Лингвистический процессор состоит из трёх основных компонентов: морфологического анализатора, синтаксического анализатора и семантического анализатора (рис. 7) [10].

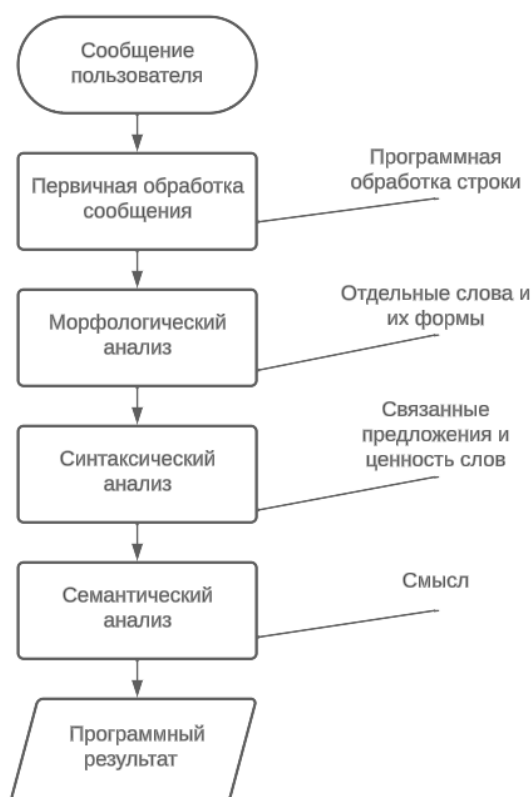


Рис. 7. Лингвистические процессы

Морфологический анализ представляет собой процесс распознавания слов из поступающих от пользователя наборов первичных данных (текстовых строк). Здесь морфологический анализатор разбивает поступившую от пользователя строку на отдельные слова. Далее, при помощи словаря, осуществляет распознавание полученных слов, производится их сопоставление со всеми другими возможными формами слова, характерными для естественного языка. Например, для русского языка будут меняться такие параметры как род, число или падеж. Сравнивая каждое отдельное слово морфологический анализатор может вернуть значение истинности, если сравнение успешно, или в противном случае ложности. Уже на этом этапе можно построить алгоритм, который сможет дать пользователю внятный ответ. Основой такого алгоритма будет являться подсчёт количества ключевых слов. Имея множество эталонных вопросов и вопрос пользователя, морфологический анализатор может посчитать количество совпадений и вернуть пользователю ответ, связанный вопрос которого имел наибольшее количество совпадений. Блок-схема алгоритма обработки сообщений пользователя с использованием морфологического анализатора представлена на рисунке 8.

Естественно, такой подход не может быть универсальным, да и некоторые вопросы могут содержать слишком большее количество совпадающих слов, при этом имея значительные расхождения в смысловой нагрузке, но и преимущество такого подхода очевидно – сравнительно простая реализация.

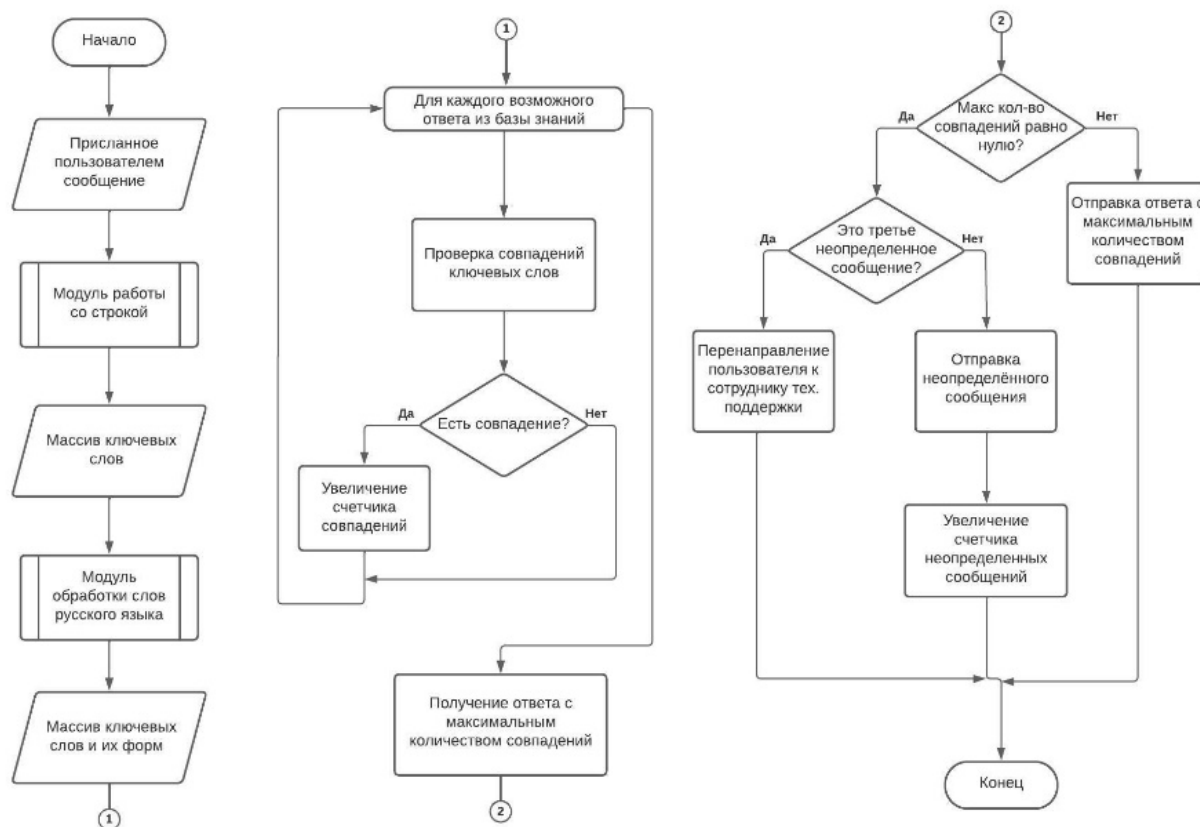


Рис. 8. Блок-схема алгоритма обработки сообщений с использованием морфологического анализатора

Следующий этап – синтаксический анализ, представляет собой обработку сообщения от пользователя как целостного предложения. Здесь анализируются связи слов в предложении, сочетаемость частей речи и т.д. Такой анализ позволит избежать реакции системы на несвязные словесные наборы. Алгоритм обработки с использованием синтаксического анализатора будет выглядеть как усложнённая версия морфологического. Помимо простого подсчёта слов здесь добавляется такой параметр как ценность слова, который постоянно варьируется. Например, ценность совпадения предлогов в сообщении должна быть намного ниже существительных или глаголов т.к. они несут меньшую смысловую нагрузку, а ценность совпавшей связи подлежащего и сказуемого значительно выше всего остального набора случайно совпавших слов в предложении.

Последний этап – семантический анализ. Самый высокий и сложный уровень обработки языка. На этом этапе сообщение пользователя рассматривается с точки зрения смысла. На сегодняшний день, для реализации семантического анализа активно используются нейронные сети, которые всё ближе стремятся к статусу «искусственного интеллекта».

### Функциональная поддержка

Под функциональной поддержкой понимается оказание пользователю типизированных бизнес-услуг не через основной пользовательских интерфейс системы, а через интерфейс системы поддержки (рис. 9).

Примерами функциональной поддержки могут служить известные многофункциональные помощники. Например, пользователь может вызвать такси через Яндекс Алису, при этом не используя основное приложение для заказа такси (рис. 10).

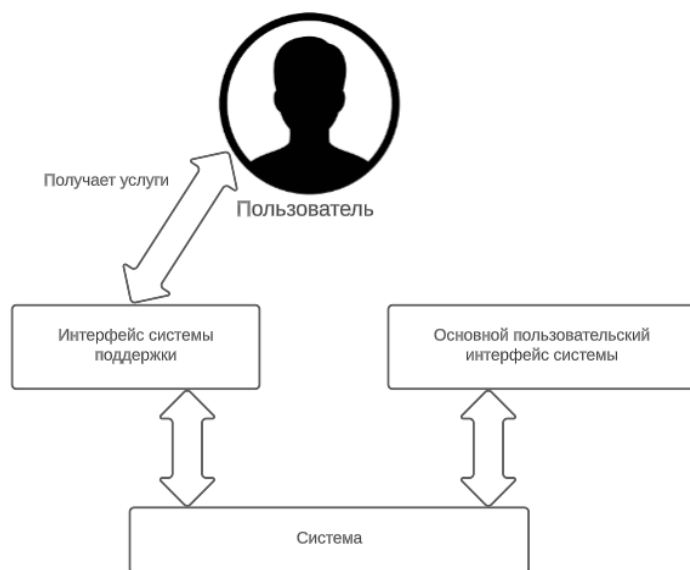


Рис. 9. Схема функциональной поддержки

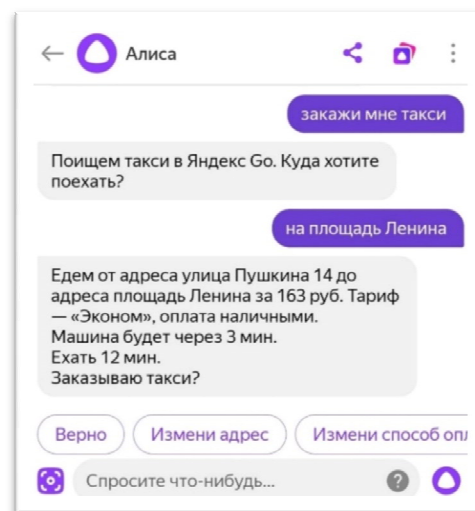


Рис. 10. Пример заказа такси через Яндекс Алису

Или пользователь может взять кредит прямо через Ассистента Сбера, не используя другие сервисы или приложения. Ассистент сам анализирует кредитный потенциал клиента и предложит доступные варианты.

Функциональная поддержка очень тесно связана с предметной областью и бизнес-процессами, которые в ней протекают. Набор услуг, которые пользователь может получать таким образом будет полностью меняться от системы к системе, в отличие от интеллектуальной поддержки, которая больше зависит от естественного человеческого языка, особенно на высоких уровнях абстракции. Интеллектуальная поддержка будет полностью меняться только при использовании другого естественного языка человека.

### Библиографический список

1. Голосовой помощник «Маруся» | Mail.ru group [Электронный ресурс]. URL: <https://marusia.mail.ru/> (дата обращения 08.01.2024).
2. Создание голосовых помощников крупными IT-компаниями | Forbes [Электронный ресурс]. URL: <https://www.forbes.ru/tehnologii/378035-bitva-za-9-mlrd-zachem-kompanii-odna-za-drugoy-vklyuchayutsya-v-voynuboltalok> (дата обращения 08.01.2024).
3. Какому бизнесу полезен голосовой бот | RUcenter [Электронный ресурс]. URL: [https://www.nic.ru/info/blog/voice-bot/?ipartner=4444&adv\\_id=191121blog\\_usl\\_fz\\_but&utm\\_source=sbscr&utm\\_medium=but&utm\\_campaign=191121blog\\_usl\\_fz](https://www.nic.ru/info/blog/voice-bot/?ipartner=4444&adv_id=191121blog_usl_fz_but&utm_source=sbscr&utm_medium=but&utm_campaign=191121blog_usl_fz) (дата обращения 08.01.2024).
4. «Жизненный цикл программного обеспечения» | QA evolution [Электронный ресурс]. URL: <https://qaevolution.ru/zhiznennyj-cikl-programmnogo-obespecheniya/> (дата обращения 08.01.2024).
5. Мобильное приложение Госуслуги | Минцифры России [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gosuslugi.ru/help/mobile> (дата обращения 08.01.2024).
6. Голосовой помощник Алиса | Yandex N.V. [Электронный ресурс]. URL: <https://yandex.ru/alice> (дата обращения 08.01.2024).
7. Голосовой помощник Салют | ООО «СберДевайсы» [Электронный ресурс]. URL: <https://salute.sber.ru/> (дата обращения 08.01.2024).
8. Google Assistant | Google Inc. [Электронный ресурс]. URL: <https://assistant.google.com/> (дата обращения 08.01.2024).
9. Чат-бот «Консультант РГМЭК» | ООО «РГМЭК» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rgmek.ru/> (дата обращения 08.01.2024).
10. Мушкова В.В. Лингвистические процессоры и обработка текстов на естественных языках // Международный студенческий научный вестник. – 2018. – № 3-2. URL: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=18266> (дата обращения: 08.01.2024).

УДК 311.14; ГРНТИ 47.47

## ИНДЕКС РЕСПЕКТАБЕЛЬНОСТИ – НОВЫЙ НАУКОМЕТРИЧЕСКИЙ ИНДЕКС КОЛЛЕКТИВНЫХ НАУЧНЫХ ИЗДАНИЙ

Вал.В. Миронов

*Рязанский государственный радиотехнический университет  
имени В. Ф. Уткина, г. Рязань, Российская Федерация, mironov1vv@mail.ru*

*Аннотация.* В статье вводится новый наукометрический индекс – индекс респектабельности научных изданий (журналов, сборников и пр.) в принципе отличный от известных. Предпринята попытка облечь интуитивное понимание респектабельности издания в строгие математические формулы и критерии. Описываются свойства нового индекса. Приведены примеры применения методики на практике применительно к изданиям «различного уровня». Традиционно наукометрические индексы основаны на анализе публикационной активности или цитируемости авторов, новый индекс основан на анализе научного авторитета авторов, выраженного в их докторских ученых степенях и (если информация доступна) в научных званиях. Методы исследования. На основе анализа профильных публикаций (как журнальных, так и сборников трудов конференций) проанализированы современные тенденции в отечественной практике редакторской политики изданий, проблем и путей их разрешения, а также в оценке деятельности научных журналов. На основе этого краткого анализа существующих издательских проблем и выделено одно существенное направление усиления роли и веса научного журнала, а именно, предложены новое понятие и новый метод расчета уровня научной респектабельности (научной представительности) научных изданий. Новый индекс респектабельности основан на анализе научных данных об авторах статей журнала, прост в применении, не требует сколь-нибудь значительных трудозатрат, позволяет не только определить меру респектабельности издания, но и ранжировать научные издания (желательно одного профиля) журналы по «взвешенному» уровню участия в них наиболее авторитетных научных работников в лице докторов наук, членов-корреспондентов РАН, академиков РАН. Результаты и дискуссия. Цель статьи - предложить оценку издания со стороны его респектабельности, его представительности, его популярности в профессиональной среде среди докторов и не докторов наук отдельно, предложить, таким образом, оценку качества журнала, учет которой позволяет редакции более эффективно управлять политикой журнала с целью увеличения его аудитории и представительности в научных базах данных. Приведена аргументация в поддержку нового индекса, сказано и о его свойствах. Предложен новый метод нечеткого ранжирования (рейтингования) журналов в зависимости от значений индекса респектабельности. В силу интуитивного понимания, нечеткости самого понятия «респектабельность» (франц. - respectable - отвечающий всем правилам приличия, почтенный, солидный, имеющий положительную репутацию, удовлетворяющий высоким требованиям) свойства и границы применимости также нечетки, размыты, что создает почву для дискуссий. Однако сама практика применения, приведенные примеры свидетельствуют, что индекс оправдывает ожидания. В практическом плане методика применена к журналам «Вестник РАН» и «Вестник РГРТУ». Результаты такого исследования впечатляют: индексы академических изданий очень высокие, индексы других изданий средние, у третьих совсем низкие, что создает основу для изменения политики изданий, становится возможным управлять изданием в определенном направлении. Заключение. На основе рассмотренных материалов теоретического и практического характера сделан вывод об приемлемости и жизнеспособности нового индекса, целесообразности его применения редакциями журналов и администрациями баз публикационных данных для управления изданиями. Каждое издание само решает, воспользоваться ли новым индексом или нет. Для конкретного издания трудозатраты на определение его индекса респектабельности минимальны. Для вычисления такого индекса со стороны баз данных, включающих тысячи изданий, возможна автоматическая обработка информации с привлечением искусственного интеллекта (ИИ) - тема для докторской диссертации. Так как границы понятия «респектабельность» размыты, то, по мнению автора, применение классической логики в такой модели ИИ проблематично. Выход может быть найден на основе новых алгебр логики, созданных автором.

*Ключевые слова:* новый наукометрический индекс, индекс респектабельности (представительности), анализ библиографических данных, доктора наук, рейтингование научных изданий, управление политикой изданий, базы публикационных данных.

## RESPECTABILITY'S INDEX IS THE NEW SCIENTOMETRIC INDEX OF COLLECTIVE SCIENTIFIC PUBLICATIONS

Valya V. Mironov

Ryazan State Radio Engineering University named after V. F. Utkin,  
Ryazan, Russian Federation, mironov1vv@mail.ru

*Abstract.* The article introduces a new scientometric index - the index of respectability - of scientific publications (journals, collections, etc.) that are fundamentally different from the known ones. An attempt was made to clothe the intuitive understanding of the respectability of the publication in strict mathematical formulas and criteria. Describes the properties of the new index. Examples of the application of the methodology in practice in relation to publications of "different levels" are given. Traditionally, scientometric indices are based on an analysis of the publication activity or citation of authors, the new index is based on an analysis of the scientific authority of the authors, expressed in their doctoral degrees and (if information is available) in scientific titles. Research methods. Based on the analysis of specialized publications (both journal and conference proceedings), current trends in the domestic practice of the editorial policy of publications, problems and ways to resolve them, as well as in evaluating the activities of scientific journals are analyzed. Based on this brief analysis of existing publishing problems, one significant direction of strengthening the role and weight of a scientific journal is singled out, namely, a new concept and a new method for calculating the level of scientific respectability (scientific representativeness) of scientific publications are proposed. The new respectability index is based on the analysis of scientific data about the authors of journal articles, is easy to use, does not require any significant labor costs, allows not only to determine the measure of the respectability of a publication, but also to rank scientific publications (preferably of the same profile) journals according to a "weighted" level of participation they include the most authoritative scientists represented by doctors of sciences, corresponding members of the Russian Academy of Sciences, and academicians of the Russian Academy of Sciences. Results and discussion. The purpose of the article is to offer an assessment of the publication in terms of its respectability, its representativeness, its popularity in the professional environment among doctors and non-doctors of science separately, thus offering an assessment of the quality of the journal, taking into account which allows the editors to more effectively manage the policy of the journal in order to increase its audience. and representativeness in scientific databases. The arguments in support of the new index are given, and its properties are also mentioned. A new method of fuzzy ranking (rating) journals is proposed depending on the values of the respectability index. Due to the intuitive understanding, the fuzziness of the very concept of "respectability" (French - respectable - meeting all the rules of decency, respectable, solid, having a positive reputation, meeting high requirements), the properties and limits of applicability are also fuzzy, blurred, which creates the basis for discussions. However, the very practice of application, the examples given show that the index lives up to expectations. In practical terms, the methodology has been applied to the journals Vestnik RAS and Vestnik RSREU. The results of such a study are impressive: the indices of academic publications are very high, the indices of other publications are average, and those of others are very low, which creates the basis for changing the policy of publications, it becomes possible to manage the publication in a certain direction. Conclusion. On the basis of the theoretical and practical materials reviewed, a conclusion was made about the acceptability and viability of the new index, the expediency of its use by the editors of journals and administrations of publication databases for managing publications. Each publication decides for itself whether to use the new index or not. For a particular publication, the labor costs for determining its respectability index are minimal. To calculate such an index from databases that include thousands of publications, it is possible to automatically process information using artificial intelligence (AI) - a topic for a doctoral dissertation. Since the boundaries of the concept of "respectability" are blurred, then, according to the author, the use of classical logic in such an AI model is problematic. A way out can be found on the basis of new logic algebras created by the author.

*Keywords:* new scientometric index, respectability (representativeness) index, analysis of bibliographic data, doctors of sciences, journal rating, journal policy management, publication databases.

### Введение

Как известно, по Постановлению Правительства РФ от 19.03.2022 г. № 414 «О некоторых вопросах применения требований и целевых значений показателей, связанных с публикационной активностью» до 31.12.2023 г. приостановлены обязательные требования об

обязательности публикаций (в перечисленном ряде случаев) в журналах, индексируемых в базах Scopus и Web of Science (WoS). Как следствие, декларируется необходимость повышения качества российских научных журналов, входящих в Перечень ВАК.

ВАК объявил, что в 2022 г. все научные журналы делятся на три категории: К1, К2, К3. К первой категории (К1) отнесены 636 журналов, ко второй категории (К2) – 1 306 журналов, к третьей категории (К3) – 648 журналов. Журналы, ранее индексировавшиеся в базах WoS, Scopus, RSCI отнесены к категории К1 (письмо ВАК от 0612.2022 г. № 02-1198 «О категорировании Перечня рецензируемых научных изданий»).

Естественно, возникла проблема разъяснения ряда новых положений в вопросах рейтингования и категорирования журналов, учета публикационной активности авторов и вообще, функционирования и полноты отражения публикационных и иных данных в наукометрических индексах научных журналов.

В этой связи 06.03.2023 г. под эгидой Российского научно-исследовательского института экономики, политики и права в научно-технической сфере (РИЭПП) совместно с Минобрнауки России и ВАК был проведен вебинар на портале <https://rng.riep.ru/>. Вебинар просмотрели более 1 500 человек (запись на: [https://www.youtube.com/watch?v=SzYm-o\\_Fmtw](https://www.youtube.com/watch?v=SzYm-o_Fmtw)).

Были проанализированы проблемные вопросы и заявлено, что сама методология рейтингования журналов будет совершенствоваться, а при повторном категорировании в конце 2023 г. будут применяться следующие критерии.

1. Качество научных статей. Оценивается логика написания, форма, структура и контекст изложения; в какой мере публикуемые статьи соответствуют уровню рецензируемого издания, вносят ли вклад в развитие издания и представляемой отрасли в целом.

2. Уникальность научных статей. Оцениваются публикуемые статьи с точки зрения вклада в область наук издания, исследования новых задач, проблем, явлений, приращения знаний, выявления ранее неизвестных свойств, закономерностей, связей и в целом мера новизны публикаций.

3. Уровень авторитетности авторов научного журнала и самого журнала. Оценивается авторитет, известность в научном сообществе России и/или за рубежом авторов журнала и самого журнала, присутствие в составе авторов авторитетных и известных персоналий, в т. ч. с ученой степенью, в том числе членов РАН.

4. Качество организации рецензирования и самого рецензирования. Оценивается тип рецензирования, число рецензентов, срок рецензирования, научный уровень рецензентов, качество и аргументированность рецензирования (в том числе при отказе в публикации).

5. Организация-учредитель. Оценивается наличие научной школы в организации-учредителе, состав редакционной коллегии, организационно-правовая форма организации-учредителя, аффилированность с научными и образовательными организациями.

6. ВАК-фактор. Оценивается наличие в журнале публикаций, студентов, аспирантов и докторантов, а также количество статей по заявленным специальностям.

### Обзор литературы

Как хорошо известно, на сегодня во всех странах мира издаются десятки тысяч научных журналов, а число «слабых» или так называемых «мусорных» журналов чрезвычайно велико и продолжает быстро расти. В этой связи возникает острая проблема ранжирования журналов по мере их качества.

А что такое качество журнала? Вообще, качество по стандарту ГОСТ – это совокупность свойств продукции, обуславливающих её пригодность удовлетворять определённые потребности в соответствии с её назначением [1]. А кто определяет стандарты качества журнала? По каким критериям? Мы еще вернемся к этой проблеме чуть позже.

В условиях жесткой конкуренции за авторов для редакции журнала важно увидеть и разрешить потенциальные проблемы. Каковы эти проблемы и методы разрешения?

Российская академия народного хозяйства и государственной службы (РАНХиГС) в декабре 2021 г. провела комплексный аудит научных журналов [2]. Заявленная цель аудита -



выявить проблемные вопросы научных журналов и предложить, на основе анализа проблем, направления роста популярности и эффективности журналов. Данные аудита и анализ других материалов, в частности, [3 – 6], обобщающих опыт изданий, позволяют в концентрированной форме выделить основные проблемные вопросы и наметить пути их разрешения. Коротко опишем основные из них.

Системность в редакционной политике издания с целью определения миссии и предназначения журнала, при необходимости переход на международные стандарты.

Международный стиль оформления самих научных статей. Как известно, в мировом научном издательском деле принята структура статьи в стиле IMRAD: Introduction (введение), Materials and methods (материалы и методы), Results (результаты) и Discussion (дискуссия) (нетрудно видеть, что журнал «Управление наукой и наукометрия» - Science Governance and Scientometrics» вполне удовлетворяет этой рекомендации, что не всегда удобно автору).

Представление только заявленных научных направлений, научных специальностей и разделов журнала.

Информативность, краткость, четкость и структурированность аннотаций и ключевых слов.

Соблюдение правовых и этических норм взаимоотношения автора и журнала.

Работа с цифровыми продуктами и сервисами со стороны редакторов издания, такими, как «Антиплагиат» и его аналоги или библиографический менеджер Totero, или ресурс Docsear. В этой связи упомянем здесь о цифровом продукте Business Intelligence (BI), включающем в себя программные средства перевода текстовой информации в приемлемую для чтения и восприятия форму. Наибольшей популярностью пользуются три продукта BI – это Power BI, Tableau и Qlik. Отметим и Force-Directed Graph, комплекс, позволяющий отслеживать связи между рецензентами статей, а также выявлять наиболее популярные темы публикаций.

Уважительное отношение со стороны редакции и рецензентов к автору статьи, в особенности, убедительность аргументации со стороны журнала в случае отказа в опубликовании.

Актуализация респектабельности (представительности) журнала в соответствующей среде аналогичных по тематике журналов и в Интернет. Причем, высокие рейтинговые позиции настойчиво отстаиваются редакцией журнала.

Удобная выплата авторского гонорара (к сожалению, таковая практика существует далеко не в каждом журнале, даже квартилей K1, K2).

Указание ВАКовских специальностей, по которым работает журнал, и где индексируется в международных и российских базах данных (с возможностью проверить эту информацию, которая ежегодно обновляется) с явным указанием квантилей и категорий.

Заказные статьи общего, обзорного или узкоспециального характеров за авторством крупных ученых, позволяющие резко увеличить количество ссылок на издание и привлечь внимание научного сообщества к журналу.

Контролировать конференции по тематике журнала и приглашать к публикации авторов лучших (по мнению экспертов издания) докладов.

Контроль за цитируемостью статей. При этом очень высокая цитируемость статей может быть всего лишь «модой» на автора или на журнал. К примеру, работа [7] имеет на сегодня более 1700 цитирований, и к ней (точнее, к ее авторам), однако, есть существенные вопросы о верификации данных. Об этой проблеме «моды» говорилось автором еще в работе [4] и предлагались пути выхода из нее при оценке индекса цитируемости *a'la* Хирш. Думается, что в подобных случаях журналу будет уместно заказать квалифицированным рецензентам комментарий к такой сверхцитируемой работе с одним вопросом – это действительно выдающаяся работа, оказавшая серьезное влияние на развитие научного направления или это «обычная» работа с высоким индексом цитирования.

Анализ проблем показывает, что одним из таких основных направлений является актуализация известности журнала. Такое позиционирование достигается главным образом за

счет публичности, доведения до научного сообщества уже известных наукометрических индексов и показателей журнала и, одновременно, введение в обиход новых, более информативных индексов или рейтингов по тем или иным позициям и стандартизация этих новых индексов

Наукометрические индексы (или показатели) в достаточно высокой мере свидетельствует о качестве журнала. И эти высокие рейтинговые позиции настойчиво отстаиваются редакцией журнала, так по данным из [6], высокорейтинговые журналы издают лишь около 5% направляемых в них статей.

Наукометрические индексы научного журнала. Выше были поставлены фундаментальные, определяющие вопросы: Кто определяет стандарты качества журнала? По каким критериям? Ныне существуют 4 (основные) показателя качества («рейтинговости») научного журнала, вычисляемые по данным о цитируемости опубликованных в нем статей.

Impact-factor (импакт-фактор, как классический, двухлетний, так и пятилетний), Eigenfactor (собственный фактор или уточняющий коэффициент к импакт-фактору), SJR (рейтинг журнала SCImago) и SNIP (нормализованное влияние источника на статью), причем оба рассчитываются в Science Direct и Scopus, Immediacy Index (индекс оперативности).  
(О характеристиках индексов см. работу [8] и сайт [9]).

### Методы исследования

*Компоненты нового индекса респектабельности.*

Введем необходимые определения, данные для алгоритмов, и дадим некоторые комментарии к ним.

Определение 1. Расположим данные всех докторов наук - авторов статей (достаточно ограниченной научной респектабельности журнала на основе публикационных данных авторов. Вводятся простые (по технике подсчета) и одновременно информативные индексы на основе оценки публикационной активности участников данного мероприятия в зависимости от их ученой степени, ФИО докторов – фамилия, имя, отчество) списком сверху вниз. Напротив каждой фамилии докторов выставим дробные слагаемые (баллы), каждое из которых есть рациональная (будем говорить «публикационная») дробь  $\frac{1}{n}$ , где число 1 в числителе есть фиксация публикации доктора в журнале, а  $n$  – это число авторов данной публикации (включая доктора, разумеется). Каждому ФИО доктора припишем порядковый номер  $i = 1, 2, \dots, N$  (сверху вниз,  $N$  - число докторов наук) и вычислим для каждого доктора сумму всех таких публикационных дробей и запишем ее в параметре  $S_i = \sum \frac{1}{n}$ , где индекс есть номер ФИО доктора в списке.

Такой список назовем предварительным D-списком.

Важно. Для академиков РАН и членов-корреспондентов РАН в расчетную дробь  $\frac{1}{n}$  для докторов наук (эвристически) внесены весовые коэффициенты (поправки). А именно, имеет место следующее определение.

Определение 2. Если авторов статьи присутствуют академики РАН или члены-корреспонденты РАН, то напротив фамилии каждого академика выставим дробные слагаемые (баллы), каждое из которых есть рациональная («публикационная») дробь  $\frac{3}{n}$ , напротив члена-корреспондента РАН дробь  $\frac{2}{n}$ , а для всех других соавторов этой статьи, по-прежнему, дробь  $\frac{1}{n}$ .

Составленный список ФИО докторов и соотнесенными параметрами  $S_i$  назовем «D-список» мероприятия.

Простой вклад (индекс) докторов наук, академиков, членов-корреспондентов в индекс респектабельности есть число  $\mu = \left[ \sum_{i=1}^N S_i \right]$ , где скобки [...] обозначают функцию части числа.

По итогам мероприятия сформируем ND-список, куда войдут аналогичные данные для всех других участников (не докторов наук, не академиков, не членов-корреспондентов) мероприятия, общим числом  $M$ .

По определению простой вклад (индекс) не докторов наук в индекс респектабельности есть число  $\eta = \left[ \sum_{i=1}^M S_i \right]$ .

*Относительный взвешенный индекс респектабельности.*

Определение 4. Относительным индексом респектабельности мероприятия назовем округленное до целого число  $T = \left[ \frac{\mu}{\mu + \eta} \right] \cdot 100\%$ .

*Обобщенный (абсолютный) индекс респектабельности.*

По определению 5 обобщенный (абсолютный) индекс респектабельности (представительности) журнала на основе публикационных данных их участников, есть упорядоченная тройка чисел

$$R = (T, N, q), \quad (1)$$

где  $T$  – относительный индекс респектабельности,  $N$  – число докторов наук, принявших участие в мероприятии,  $q$  – число статей, представленных докторами наук без соавторства.

*Замечание. Автор так часто упоминает интуицию, что это требует пояснений и комментариев философского толка.*

По мнению автора такая ситуация сложилась и с проблемой индекса Хирша [10], когда под плодотворную интуитивную идею «квадрата Хирша» была неявно подведена некая статистика, а потом этой статистикой явно была обоснована идея. Убедительным этот метод назвать трудно, именно поэтому работа Хирша подверглась и подвергается критике (см. работы [4, 11] и библиографию к ним). Результат Хирша стали убедительным после апробации пользователями, ибо стало удобно ранжировать ученых и научные коллективы для «мотивированного» финансирования и карьерных продвижений. Следом индекс понравился и всем остальным, ну, значит, хорошее предложение. Такая апробация предстоит и индексу респектабельности, его «научную» судьбу решит именно практика применения. Конец замечания.

### Сравнение индексов респектабельности двух журналов

На основе формулы (1) предложим критерий сравнения индексов респектабельности двух изданий, принадлежащих, что желательно, к одной и той же научной отрасли (математика, физика, наукометрия и т.п.), но вовсе не обязательно, ибо критерий оценивает эффективность работы издания, точнее, руководства и всего менеджмента, оценивает привлекательность издания со стороны авторов высокого уровня.

Определение 6. Для двух научных изданий  $M_1$  и  $M_2$  с индексами респектабельности  $R_1 = (T_1, N_1, q_1)$  и  $R_2 = (T_2, N_2, q_2)$  соответственно положим по определению, что  $M_1$  респектабельнее (представительнее)  $M_2$ , если (и только если)

$$R_1 > R_2 \stackrel{\text{def}}{\Leftrightarrow} \begin{cases} T_1 > T_2, \\ (T_1 = T_2) \wedge (N_1 > N_2), \\ (T_1 = T_2) \wedge (N_1 = N_2) \wedge (q_1 > q_2). \end{cases} \quad (2)$$

В противном случае, по определению, журналы  $M_1$  и  $M_2$  имеют одинаковый индекс респектабельности ( $R_1 = R_2$ ).

### Нечеткое ранжирование (рейтингование) научных журналов по индексу респектабельности

Автору представляется (на основе опыта и сравнения индексов различных изданий), что качественное ранжирование научных мероприятий по индексу респектабельности (пред-

ставительности) и одновременно с предложением по международной квартелизации (индекс Q) и российской (расширенной автором) категоризации (индекс K) может быть проведено по следующему эвристическому правилу на основе подходов нечеткой логики:

Определение 7. Если  $T > 40\%$ , то индекс респектабельности «высокий» (квартиль Q1 = категория K1). В дополнение к этому, если  $40\% < T \leq 50\%$ , то индекс респектабельности «высокий с минусом» [квартиль Q1(-) = категория K1(-)]; если  $50\% < T \leq 60\%$ , то индекс респектабельности «высокий» [квартиль Q1 = категория K1]; если  $T > 60\%$ , то индекс респектабельности «сверх высокий» [квартиль Q1(+) = категория K1(+)].

Если  $30\% < T \leq 40\%$ , то индекс респектабельности «хороший» (Q2 = K2). В дополнение к этому, если  $30\% < T \leq 33\%$ , то индекс респектабельности «хороший с минусом» [квартиль Q2(-) = категория K2(-)]; если  $33\% < T \leq 36\%$ , то индекс респектабельности «хороший» [квартиль Q2 = категория K2]; если  $36\% < T \leq 40\%$ , то индекс респектабельности «хороший с плюсом» [квартиль Q2(+) = категория K2(+)].

Если  $10\% < T \leq 30\%$ , то индекс респектабельности «удовлетворительный» (Q3 = K3). В дополнение к этому, если  $10\% < T \leq 15\%$ , то индекс респектабельности «удовлетворительный с минусом» [квартиль Q3(-) = категория K3(-)]; если  $15\% < T \leq 25\%$ , то индекс респектабельности «удовлетворительный» (квартиль Q3 = категория K3); если  $25\% < T \leq 30\%$ , то индекс респектабельности «удовлетворительный с плюсом» [квартиль Q3(+) = категория K3(+)].

Если  $T \leq 10\%$ , то индекс респектабельности «проблемный» (Q4 = K4). В дополнение к этому, если  $T \leq 5\%$ , то индекс респектабельности «проблемный с минусом» [квартиль Q4(-) = категория K4(-)];

Свойства индекса респектабельности.

Достижение цели – знание индекса респектабельности дает достаточное представление о мере респектабельности издания и, как следствие, о желании или нежелании авторов сотрудничать с изданием.

Это представляется очевидным.

Относительный индекс конкретного издания устойчив (в классическом понимании устойчивости) к небольшим изменениям (или ошибкам) в подсчете баллов респектабельности.

В самом деле, индекс  

$$T = \left( \left[ \frac{\mu}{\mu + \eta} \right] \right) \cdot 100\%.$$

Придадим компонентам небольшое приращение (ошибку e). Получим

$$\begin{aligned} T(e) &= \left( \left[ \frac{\mu + e}{(\mu + e) + (\eta + e)} \right] \right) \cdot 100\% = \\ &= \left( \left[ \frac{\mu}{(\mu + \eta + 2e)} \right] \right) \cdot 100\% + \\ &+ \left( \left[ \frac{e}{(\mu + \eta + 2e)} \right] \right) \cdot 100\% \xrightarrow{e \rightarrow 0} \left( \left[ \frac{\mu}{\mu + \eta} \right] \right) \cdot 100\%. \end{aligned}$$

Индекс одного и того же издания может меняться, иногда существенно, от номера к номеру.

Это представляется очевидным и подтверждается приведенными данными экспериментов.

Индекс легко и быстро рассчитывается.

Это доказывается практикой применения. Так, к примеру, для определения индекса респектабельности журнала «Управление наукой. Наукометрия» ушло 1 час времени. На другие издания ушло соизмеримое время по каждому изданию.

Информация для подсчета индекса доступна на основе опубликованных работ и традиционных сведений об авторах

Это представляется очевидным.

В некоторых проблемных случаях (как то, выяснение научное звания авторов), журнал способен управлять политикой и правилами публикаций, чтобы авторы сами предоставляли такую информацию.

Это представляется очевидным.

### Результаты и дискуссия

В данном разделе некоторые фамилии, имена, отчества авторов приведены полностью другие в сокращенном варианте, для подсчета индексов это не принципиально. Одни исходные данные приведены полностью равно и выводы из них, другие в сокращенном варианте (из соображения экономии места).

Расчет индекса респектабельности для журнала «Вестник РАН», том 90, 2020 г. [12]

Номер 1. Общее количество участников в томе – 18. Всего докторов в томе - 13. Статей докторов без соавторства - 6. Результаты расчетов:  $\mu = 11,75$ ;  $\eta = 2,0$ ;  $T = 85\%$ .

Номер 2. Общее количество участников в томе - 16. Всего докторов в томе - 10. Статей докторов без соавторства – 6. Результаты расчетов:  $\mu = 12,2$ ;  $\eta = 1,4$ ;  $T = 89\%$ .

Номер 3. Общее количество участников в томе - 10. Всего докторов в томе - 10. Статей докторов без соавторства – 10.

Номер 4. Общее количество участников в томе – 15. Всего докторов в томе – 10. Статей докторов без соавторства – 6. Результаты расчетов:  $\mu = 17,84$ ;  $\eta = 2,33$ ;  $T = 88\%$ .

Номер 5. Общее количество участников в томе – 22. Всего докторов в томе – 13. Статей докторов без соавторства – 1. Результаты расчетов:  $\mu = 9,34$ ;  $\eta = 6,66$ ;  $T = 58\%$ .

Номер 6. Общее количество участников в томе – 21; Всего докторов в томе – 14; Статей докторов без соавторства - 3. Результаты расчетов:  $\mu = 14,51$ ;  $\eta = 2,16$ ;  $T = 87\%$ .

Номер 7. Общее количество участников в томе – 19. Всего докторов в томе – 8. Статей докторов без соавторства – 1. Результаты расчетов:  $\mu = 7,44$ ;  $\eta = 5,43$ ;  $T = 57\%$ .

Номер 8. Общее количество участников в томе - 24. Всего докторов в томе -12.

Статей докторов без соавторства – 2. Результаты расчетов:  $\mu = 7,16$ ;  $\eta = 5,17$ ;  $T = 58\%$ .

Номер 9. Общее количество участников в томе – 11. Всего докторов в томе – 10.

Результаты расчетов:  $\mu = 8$ ;  $\eta = 1$ ;  $T = 88\%$ .

Номер 10. Общее количество участников в томе – 22. Всего докторов в томе – 12. Статей докторов без соавторства – 3. Результаты расчетов  $\mu = 7,99$ ;  $\eta = 3,59$ ;  $T = 68\%$ .

Номер 11. Общее количество участников в томе – 11. Всего докторов в томе – 9. Статей докторов без соавторства – 6. Результаты расчетов:  $\mu = 15$ ;  $\eta = 1,5$ ;  $T = 90\%$ .

Номер 12. Общее количество участников в томе – 24. Всего докторов в томе – 10.

Статей докторов без соавторства – 2. Результаты расчетов:  $\mu = 6,9$ ;  $\eta = 4,3$ ;  $T = 61\%$ .

В среднем по всему тому 90 «Вестника РАН» индекс респектабельности  $T_{ср} = 74\%$ , что является сверх высоким показателем (индекс Q1(+)).

Расчет индекса респектабельности для журнала «Вестник РГРТУ», 2022 г. [13]

Общее количество участников – 112. Всего докторов в томе – 30. Количество статей, написанных докторами наук без соавторства – 7. Общее количество статей – 63.

Расчеты показали: за весь 2022 г.:  $\mu = 18,55$ ;  $\eta = 44,45$ ;  $T = 29\%$ . И, следовательно, «Вестник РГРТУ» имел в 2022 г. удовлетворительный с плюсом индекс респектабельности (Q3+).

### Заключение

Таким образом, в работе проанализированы современные тенденции в мировой практике редактирования, издания и оценки деятельности научных журналов. Проведен краткий анализ существующих издательских проблем и выделено одно существенное направление усиления роли и веса научного журнала. А именно, предложены новое понятие и новый метод расчета уровня научной респектабельности (научной представительности) научных журналов. Новый индекс респектабельности основан на анализе данных об авторах статей журнала, индекс прост в использовании и позволяет ранжировать научные журналы по «взве-

шенному» уровню участия в них наиболее авторитетных научных работников в лице докторов наук.

Вообще, данная работа автора есть попытка отойти от принятых субъективных шаблонов и схем в оценке уровня респектабельности (представительности) научных журналов, поставить этот процесс оценки на объективную, научную основу.

Кто будет собирать и обрабатывать данные по индексу респектабельности? Автор анонсирует проект, реализация которого позволит подключить к этому процессу (считывание данных и их обработка) искусственный интеллект (ИИ). Так как границы понятия «респектабельность» размыты, то, по мнению автора, применение классической логики в такой модели ИИ проблематично. Выход может быть найден на основе новых алгебр логики, созданных автором и опубликованным в работе [14] (тексты работ доступны на сайте РГРТУ).

Здесь уместно будет заметить, что проблема описания возможностей ИИ или границ его возможностей – это очень сложная задача, подходов к ее решению не видно. Выдающийся математик современности С. Смейл выдвинул эту проблему, как одну из проблем столетия [15] (данная лекция была прочитана по случаю 60-летия акад. В.И. Арнольда в Филдсовском институте, в Торонто, в Канаде в июне 1997 г.). Многие специалисты по ИИ склоняются к мысли, что ИИ не сможет получать принципиально новое знание, в частности, получать решения, основанные на интуиции. В этом контексте задача об интуитивной природе индекса респектабельности приобретает особый оттенок.

### Библиографический список

- ГОСТ 15467-79 Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. Издательство стандартов, 1979.
- Управление научным изданием – вопросы эффективности // <http://unkniga.ru/vuT/13648-upravlenie-nauchnym-izdaniem...> (дата обращения 10.02.2024)/
- Gilyarevskii R.S. On the incorrect use of citation indexes for assessment by comparison of science divisions // *Automatic Documentation and Mathematical Linguistics*. – 2022. – Vol. 56, № 1. – P. 26–29.
- Миронов В.В. Новые индексы публикационной активности // *Вестник РАН*, 2020, Т. 90, № 10, С. 959 – 966.
- Управление научным изданием: вопросы эффективности. – URL: <http://unkniga.ru/vuT/13648-upravlenie-nauchnym-izdaniem...> (дата обращения 10.02.2024)/
- Научное издание международного уровня – 2019: стратегия и тактика управления и развития // *Материалы 8-й Международной научно-практ. Конференции* (г. Москва, 23–26 апреля 2019 г.) – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. – С. 78–84. DOI: 10.24069/konf-23-26-04-2019.
- Migliaccio E., Giorgio M., Mele S., Pelicci G., Reboldi P., Pandolfi P. P., Lanfrancione L., Pelicci P. G. The p66shc adaptor protein controls oxidative stress response and life span in mammals. *Nature*. 1999;402(6759)–309–313. DOI– 10.1038/46311
- Построение рейтингов журналов по менеджменту с помощью методов теории коллективного выбора: препринт WP7/2011/04 [Текст] / Ф. Т. Алескеров, В. В. Писляков, А. Н. Субочев, А. Г. Чистяков; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». – М. : Изд. дом Высшей школы экономики, 2011. – 44 с.
- <http://www.kgau.ru/new/biblioteka/17/8/1.pdf?ysclid=lx2z8ca7v75852022> (дата обращения 10.02.2024)
- Hirsch J. E. An index to quantify an individual's scientific research output // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* — 2005. — Vol. 102. - № 46. — P. 16569—16572.
- Ludo Waltman, Nees Jan van Eck. Robust Evolutionary Algorithm Design for Socio-Economic Simulation: Some Comments // *Comput. Econ* – 2009. - 33:103–105, DOI 10.1007/s10614-008-9148-0.
- sciencejournals.ru» Архивы выпусков»vestnik. Электронные версии научных журналов. Вестник РАН.
- <http://vestnik.rsreu.ru> (Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. Архив)
- Миронов В. В. Новые алгебры логики на логических словах и проблема тождеств // *Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2022* [текст]– сб. тр. V междунар. науч.-техн. форума– в 10 т. Т.5. Рязань–Рязанский государственный радиотехнический университет. 2022. С. 54 – 69.
- Smale, S. "Mathematical Problems for the Next Century." *Math. Intelligencer*, 20, No. 2, 7-15, 1998.

УДК: 65.011.56

## АНАЛИЗ ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ КОНТРОЛЛЕРОВ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЕМ ПРЕДПРИЯТИЙ

А.А. Сурков

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, SurkovArtem62@yandex.ru*

*Аннотация.* В статье производится анализ промышленных логических контроллеров (ПЛК). Акцент делается на выявление достоинств и недостатков существующих схемотехнических решений. Выносятся и реализуются требования к собственной разработке ПЛК для дальнейшего создания системы управления оборудованием.

*Ключевые слова:* программируемые логический контроллер, микропроцессорное устройство, промышленная автоматика, управление промышленными процессами.

## ANALYSIS OF PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLERS FOR THE DEVELOPMENT OF ENTERPRISE EQUIPMENT CONTROL SYSTEMS

A.A. Surkov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, SurkovArtem62@yandex.ru*

*Annotation.* The article analyzes industrial logic controllers. The emphasis is on identifying the advantages and disadvantages of existing circuit solutions. Requirements for the in-house development of a PLC are identified and implemented for the further creation of an equipment control system.

*Keywords:* programmable logic controller, microprocessor device, industrial automation, industrial process control.

Программируемый логический контроллер (ПЛК) представляет собой микропроцессорное устройство, предназначенное для хранения, сбора, обработки информации и выработки команд управления.

В настоящее время недостаточно ПЛК с простым и понятным алгоритмом взаимодействия человека с приборами, станками и так далее. Чаще всего они обладают сложной структурой, требующей от пользователя (оператора) прохождения обучения, для управления заданным оборудованием. К тому же, микропроцессорные устройства обладают высокой ценой.

### *Понятие системы управления оборудованием предприятий*

Система управления оборудованием предприятий с участием программируемых логических контроллеров представляет собой комплексное программно-аппаратное обеспечение, разработанное для мониторинга, управления и контроля различными процессами на производстве или в инфраструктурных системах.

Основные компоненты системы управления оборудованием предприятий с участием ПЛК включают:

1. ПЛК, являющейся центральным элементом системы управления. Они отвечают за выполнение программных инструкций, контролируя и управляя различными устройствами и процессами на основе входных сигналов и программных алгоритмов.

2. Датчики и исполнительные устройства используются для сбора данных о состоянии окружающей среды или об оборудовании. Исполнительные устройства, такие как моторы, клапаны, насосы и так далее, используются для выполнения действий в соответствии с командами, поступающими от ПЛК.

3. Коммуникационное оборудование, обеспечивает связь между ПЛК, датчиками, исполнительными устройствами и другими компонентами системы управления [1].

4. Человеко-машинный интерфейс предоставляет пользовательский интерфейс для мониторинга и управления процессами. Она собирает данные от ПЛК, отображает их в удобном виде для оператора и позволяет принимать управляющие решения.

#### Анализ ПЛК

В современной промышленности программируемые логические контроллеры играют ключевую роль в автоматизации производственных процессов. Несмотря на широкий спектр производителей, среди них можно выделить несколько лидеров. Ниже рассматриваются и сравниваются четыре наиболее популярных мировых производителя ПЛК и отечественная разработка компании "Овен" [2]. На основе анализа выделяются ключевые недостатки представленных фирм, а также выносятся и реализовываются требования к собственной разработке.

Таблица 1. Анализ характеристик некоторых современных ПЛК

Марка	Микроконтроллер	Среда разработки	Аппаратный интерфейс	Цена
Siemens	Основаны на процессорах ARM Cortex-M3, а также более мощные ARM Cortex-A15 или ARM Cortex-A9	Используется интегрированная среда разработки TIA Portal	Ethernet, Profibus, Profinet и другие	От \$500
Allen-Bradley	Основаны на процессорах Intel	Используется среда разработки Rockwell Studio 5000	Ethernet/IP, ControlNet, DeviceNet и другие	От \$1000
Mitsubishi Electric	Обычно разрабатываются собственными инженерами компании	Используется среда разработки GX Works	Ethernet, CC-Link, Profibus, Modbus и другие	От \$800
Omoron	Основаны на процессорах, на базе архитектуры Renesas	Используется среда разработки CX-One	Ethernet, RS-232, RS-485 и другие	От \$400
Овен	Чаще всего используются микроконтроллеры основанные на ARM	Используется собственное специализированное программное обеспечение	Ethernet, Modbus и другие	От \$300

Таблица 2. Используемые языки программирования

Марка	Языки программирования
Siemens	Siemens использует разнообразные языки программирования, включая Ladder Diagram (LD), Function Block Diagram (FBD), Structured Text (ST), Sequential Function Chart (SFC) и Instruction List (IL).
Allen-Bradley	ПЛК поддерживают разнообразные языки программирования, такие как Ladder Diagram (LD), Function Block Diagram (FBD), Structured Text (ST), Sequential Function Chart (SFC) и другие.
Mitsubishi Electric	Для программирования используются различные языки, включая Ladder Diagram (LD), Sequential Function Chart (SFC), Instruction List (IL), Structured Text (ST) и другие.
Omoron	ПЛК Omron поддерживают языки программирования, такие как Ladder Diagram (LD), Structured Text (ST) и другие.
Овен	Для программирования используются языки, такие как Ladder Diagram (LD), Structured Text (ST) и другие.

#### Требования к собственной разработке

Основными общими недостатками, выявленными в результате анализа, являются:

- высокая стоимость: ПЛК обычно имеют довольно высокую цену, особенно когда речь идет о более мощных и расширенных моделях. Это может сделать их недоступными для небольших предприятий или проектов с ограниченным бюджетом.

- сложность программирования: для программирования ПЛК может потребоваться специализированный навык или обучение, особенно для более сложных систем. Это может создать препятствие для новичков или неопытных пользователей.



Разберем каждый недостаток по очереди.

Стоимость ПЛК в большинстве случаев зависит от выполняемых операций, и стоимости компонентов, наибольшее влияние оказывает цена вычислителя. В соответствии со сферой применения программируемого логического контроллера выбирают мощностные характеристики микроконтроллера, а также необходимые протоколы обмена данными.

Сложность программирования ПЛК может в значительной степени зависеть от умений и привычек оператора. Опытный пользователь может быть знаком с одной средой разработки или языком программирования и чувствовать себя комфортно при работе с ними, в то время как другая среда разработки или язык программирования может быть для него непривычным и вызывать трудности [3].

Таким образом, один человек может успешно работать с одной программой, в то время как другой может испытывать затруднения с тем же самым инструментом.

Решением выявленных в результате анализа проблем может служить разработка программируемого логического контроллера, основанного на модульной системе, состоящей из обвязки и платы микроконтроллера. В данном случае обвязка будет отвечать за выполнение и регулировку различных задач предприятия, а плата микроконтроллера за выработку команд. Главным преимуществом такой конфигурации является то, что в качестве вычислителя ПЛК можно будет использовать практически любой микроконтроллер, что позволит легко подбирать мощностные характеристики, протоколы обмена данными и соответственно регулировать цену всей разработки.

Также при такой схеме, компания сможет выбрать язык программирования и среду разработки сама, в зависимости от знаний своих сотрудников.

В соответствии с вышесказанным, для нивелирования описанных недостатков, был разработан следующий ПЛК (рисунок 1).



Рис. 1. Вид разработанного ПЛК для создания системы управления предприятием

Разработанный ПЛК состоит из следующих функциональных блоков:

- блок измерения температуры;
- блок реле;
- блок управления моторами;
- блок питания микроконтроллера;
- блок питания периферийных устройств.

*Блок измерения температуры.* Основан на сигма-дельта АЦП AD7170. Используется для контроля и регулировки промышленных процессов, мониторинга оборудования, контроля окружающей среды, диагностики и предупреждения аварий.

*Блок реле.* Основан на реле NRP-14-C-12D-H. Используется для управления нагрузкой, изоляции сигналов, защиты от перегрузок и коротких замыканий, управления последовательностью операций, резервного питания и резервного управления.

*Блок управления моторами.* Основан на оптопарах H11L1M. Используется для запуска и остановки моторов, управления скоростью и направлением вращения.

*Блок питания микроконтроллера.* Необходим для стабильного питания микроконтроллера, обеспечивая его нормальное функционирование и защиту от возможных сбоев.

*Блок питания периферийных устройств.* Обеспечивает стабильное электропитание для внешних устройств, предоставляя необходимое напряжение и ток для работы периферии.

Краткие технические характеристики данной конфигурации:

*Микроконтроллеры.* В качестве вычислителя используется ESP32, но также могут использоваться и другие, например STM32, все что необходимо, развести микроконтроллер в соответствии с “распиновкой” обвязки.

*Язык программирования.* Для программирования ESP32, в зависимости от среды разработки подходят: Arduino, C/C++, Python.

*Среда разработки.* Существует несколько популярных сред разработки для программирования микроконтроллера ESP32, например Arduino IDE, PlatformIO, ESP-IDF, MicroPython и CircuitPython.

Выбор среды разработки зависит от предпочтений, уровня опыта и требований проекта. Некоторые разработчики предпочитают Arduino IDE из-за его простоты использования, в то время как другие могут выбрать ESP-IDF для более глубокого контроля над устройством.

*Протоколы обмена данными.* В качестве аппаратного интерфейса используется WiFi и Bluetooth.

*Цена.* До \$300.

## Выводы

С приходом программируемого логического контроллера в промышленную автоматику управление промышленными процессами существенно упростилось. Функции ПЛК реализуются с помощью программы, что позволяет постоянно адаптировать их к работе в новых условиях [4]. Но, с другой стороны, требуют усилий – затраты человеческих и вычислительных ресурсов, которые необходимо минимизировать.

Последнего можно добиться разработкой модульной системы микропроцессорного устройства, позволяющей пользователю самому выбирать среду разработки и язык программирования. К тому же создание такой системы позволит решить актуальную проблему по созданию отечественных ПЛК [5], особенно остро ощущающуюся сейчас, в период импортозамещения в России.

## Библиографический список

1. Ключев А.О., Ковязина Д.Р., Петров Е.В., Платунов А.Е. Интерфейсы периферийных устройств. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2010. – 290 с.
2. Интеллектуальные системы автоматизации технологии. - URL: <https://insat.ru/products/?category=20> (дата обращения: 15.02.2023).
3. Петров И. В. Программируемые контроллеры. Стандартные языки и приемы прикладного проектирования / под ред. проф. В. П. Дьяконова. М.: СОЛОН-Пресс, 2004. 256с.
4. Обзор и анализ программируемых логических контроллеров. - URL: <https://clck.ru/36TNCz> (дата обращения: 19.02.2023).
5. Файзрахманов Р. А., Салутин Ю. А., Володин В. Д., Шаронов А. А., Полевщиков И. С. Опыт использования российских технологий при построении тренажера погрузочно-разгрузочного устройства // Science Time. - 2014. №10(10). - С. 357-364.

УДК 528.9; ГРНТИ 20.23.27

## РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ КАРТ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Г.В. Гульяшкин

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, zaklol2000@gmail.com

*Аннотация.* В статье проведено сравнение существующих систем и выделены преимущества будущего решения. Представлены основные средства разработки, используемые для создания будущей системы. Описана структура и представлен интерфейс разработанной системы.

*Ключевые слова:* геоинформационные системы, ГИС, разработка ПО, картография, дистанционное зондирование Земли, визуализация геоданных, сравнение геоинформационных решений, универсальное ПО, бесплатная геоинформационная система, повышение качества принятия решений, оптимизация расходов.

## DEVELOPMENT OF AN INFORMATION SYSTEM FOR GENERATING MAPS BASED ON EARTH REMOTE SENSING DATA

G.V. Gulnyashkin

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, zaklol2000@gmail.com

*The summary.* The article compares existing geoinformation systems, highlighting the advantages of the future solution. It introduces the main development tools used in creating the prospective system and describes the structure while presenting the interface of the developed system.

*Keywords:* geoinformation systems, GIS, software development, cartography, Earth remote sensing, geodata visualization, comparison of geoinformation solutions, universal software, free geoinformation system, improving decision-making quality, cost optimization.

Геоинформационные системы (ГИС), опирающиеся на данные дистанционного зондирования, стали неотъемлемым инструментом для актуализации картографических данных, адаптируя их к динамично меняющемуся миру. Они находят применение в разнообразных сферах – от экологического мониторинга до градостроительства, обеспечивая специалистам доступ к глубокому анализу карт. Внедрение ГИС способствует повышению качества и эффективности работы в областях, таких как сельское хозяйство и управление природными ресурсами, ускоряя отклик на чрезвычайные ситуации. Эти системы упрощают интеграцию и анализ данных, что способствует улучшению процессов принятия решений и способствует прогрессу в области геоинформационных технологий. Благодаря бесплатным ГИС, доступ к картам и их анализ становится проще, что значительно повышает продуктивность работы специалистов в самых разных областях, включая реагирование на экстренные ситуации и городское планирование [1].

### Сравнение существующих решений

В настоящее время существует множество геоинформационных систем ориентированных на различные потребности. Однако, не все из них подходят для конкретных задач, связанных с анализом геоданных и картографированием. Рассмотрев и сравнив доступные системы, мы приходим к выводу о необходимости разработки нового программного обеспечения, специализированного на решении уникальных проблем в данной области [2].

Как показано в таблице 1, существующие ГИС, такие как "StaticMapLite", "Панорама" и "Роскарта", а также "OpenStreetMap" и "2ГИС", различаются по многим параметрам, включая лицензирование, сложность интерфейса, функциональные возможности по созданию карт, масштабированию, поиску и загрузке карт. Хотя системы, как "OpenStreetMap" и "Роскарта", предлагают многие функции бесплатно, они могут быть сложными в освоении и не

всегда предоставляют все необходимые инструменты для специализированной работы. С другой стороны, коммерческие ГИС, такие как "Панорама" и "2ГИС", могут предложить более продвинутые функции, но это также ведет к дополнительным затратам и ограничениям, связанным с лицензионной политикой [3].

Таблица 1. Сравнение существующих геоинформационных систем

Параметры/Системы	StaticMapLite	Панорама	OpenStreetMap	Роскарта	2ГИС
Лицензирование	Бесплатно/ Платно	Платно	Бесплатно	Бесплатно/ Платно	Бесплатно/ Платно
Интерфейс	Простой	Сложный интерфейс, требующий время на освоение	Простой	Сложный интерфейс, требующий время на освоение	Простой
Создание карт	Специализированные	Многофункциональный	Многофункциональный	Многофункциональный	Отсутствует
Масштабирование карт	Нет масштабирования	Поддерживает масштабирование карт	Поддерживает масштабирование карт	Поддерживает масштабирование карт	Поддерживает масштабирование карт
Поиск по названию объекта	Нет поиска по названию	Есть поиск по названию	Нет поиска по названию	Есть поиск по названию	Есть поиск по названию
Загрузка карты	Загрузка в виде изображений	Есть загрузка карт	Многофункциональная загрузка карт	Есть загрузка карт	Нет загрузки собственных карт

Отсюда следует, что для решения уникальных задач, связанных с обработкой и анализом геоданных, требуется новое ПО, которое сможет совместить простоту интерфейса с необходимым набором функций, таких как специализированное создание карт, масштабирование и интеграция с внешними базами данных. Это ПО должно быть легко интегрируемо с существующими системами и предоставлять гибкие опции для работы с различными типами картографических данных, включая растровые и мультиспектральные изображения.

Таким образом, рассмотрение аналогов подчеркивает пробел в текущем наборе геоинформационных систем и подтверждает потребность в разработке нового, более универсального и доступного ПО для удовлетворения специфических требований профессионалов в этой сфере.

### Средства разработки

В рамках разработки новой геоинформационной системы, особое внимание уделяется выбору инструментов и технологий, которые позволят создать надежное и масштабируемое решение. Ключевым компонентом является Microsoft Visual Studio – комплексная интегрированная среда разработки от Microsoft, предлагающая широкий спектр инструментов для создания кроссплатформенных приложений. Эта среда поддерживает множество языков программирования и платформу .NET, что обеспечивает гибкость в разработке и способность приложений работать в разнообразных средах.

Язык программирования C#, разработанный в рамках платформы .NET от Microsoft, выбран для создания геоинформационной системы за счет его гибкости и мощности. C# обеспечивает строгую типизацию и поддержку объектно-ориентированного программирования, что способствует созданию структурированных и легко масштабируемых приложений. Интеграция с .NET расширяет возможности C# за счет доступа к обширной библиотеке классов, упрощая разработку приложений с использованием графики, баз данных и веб-сервисов. Кроссплатформенность языка позволяет разрабатывать приложения, работающие на различных устройствах и операционных системах.

Для реализации уникальных и специализированных ГИС-задач, не укладывающихся в рамки стандартных решений, применяется GIS ToolKit Active. Этот комплекс разработки ба-

зируется на интерфейсе доступа MAPAPI к ГИС-ядру "Панорама" и включает в себя набор COM объектов и компонентов ActiveX. GIS ToolKit Active предоставляет возможность создавать приложения в любой среде программирования, которая поддерживает ActiveX, оставляя пространство для интеграции собственных алгоритмов и методов обработки данных [4].

Принцип работы разрабатываемых ГИС-приложений заключается в управлении и обработке векторных, растровых и матричных карт, а также данных с внешних серверов, геопорталов и СУБД. Это обеспечивается за счет взаимодействия с компонентами ГИС-ядра через интерфейс доступа MAPAPI, позволяя приложениям эффективно "общаться" с исходными данными и представлять их пользователю в удобном виде.

В целом, выбранные инструменты разработки – Microsoft Visual Studio, язык программирования C# и GIS ToolKit Active – составляют основу для создания ГИС-приложения, которое будет отвечать всем современным требованиям и способно будет адаптироваться под различные задачи, с которыми сталкиваются специалисты в области экологии, геологии, градостроительства и сельского хозяйства.

### Структура разрабатываемой системы

Рассмотрим структуру ГИС системы на рисунке 1 чтобы лучше понять взаимодействие между различными компонентами.

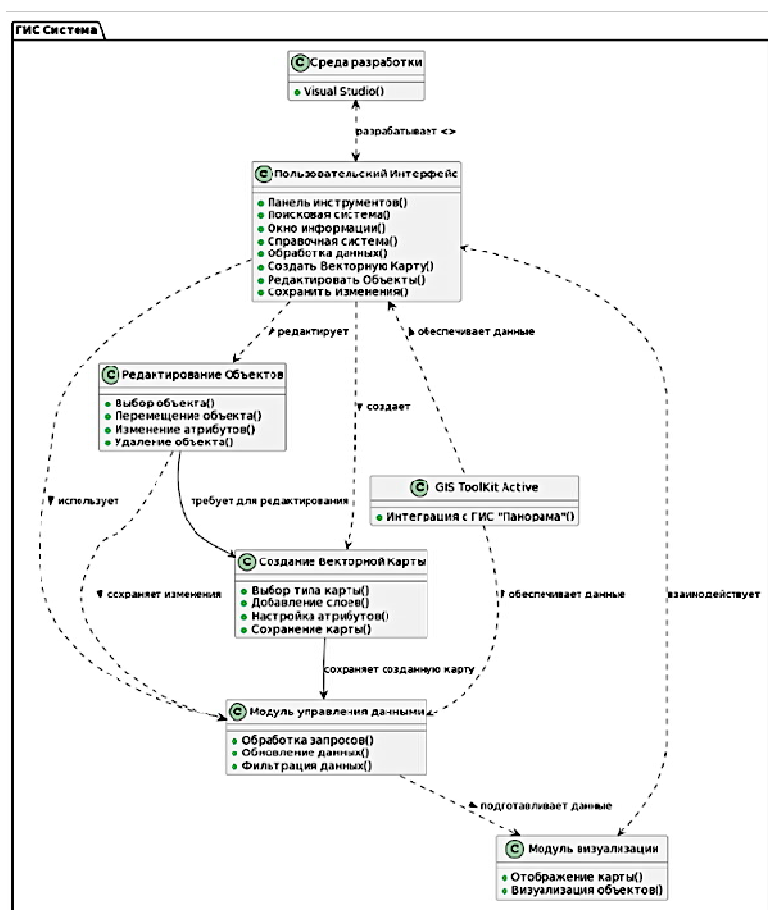


Рис.1. Структура разработанной системы

Пользовательский Интерфейс - центральный компонент, через который пользователи взаимодействуют с системой. Этот интерфейс предоставляет различные инструменты для облегчения работы с ГИС. Включает в себя панель инструментов для быстрого доступа к функциям, поисковую систему для эффективного поиска данных, окно информации для ото-

бражения подробной информации, справочную систему для получения дополнительной помощи и обработку данных для выполнения различных операций. Пользователь также может создавать новые векторные карты, редактировать объекты на существующих картах и сохранять внесенные изменения.

GIS ToolKit Active - представляет собой набор инструментов, направленных на упрощение использования и обмен данными с картами в системе. Этот компонент совместим с ГИС "Панорама", обеспечивая удобство работы с геопространственными данными. Он интегрируется в систему, обеспечивая возможность работы с данными из внешней ГИС. GIS ToolKit Active также взаимодействует с пользовательским интерфейсом, предоставляя дополнительные инструменты для работы с географической информацией.

Модуль управления данными - отвечает за обработку запросов, обновление и фильтрацию данных в системе. Этот модуль выполняет важные функции, такие как обработка запросов от пользовательского интерфейса, обновление данных для поддержания их актуальности и фильтрация данных для предоставления пользователю необходимой информации. В рамках взаимодействия с Созданием Векторной Карты, модуль управления данными сохраняет созданную карту.

Модуль визуализации - обеспечивает отображение карты и объектов на ней. Этот модуль преобразует данные, полученные от модуля управления данными, в графическое представление для пользователя. Он отвечает за визуализацию пространственных данных, делая их понятными и наглядными для пользователя. Включает в себя функции отображения карты и визуализации объектов на ней.

Среда разработки - программное окружение, используемое для разработки и тестирования ГИС системы. В данном случае используется Visual Studio, предоставляющая удобные инструменты для создания, отладки и тестирования кода ГИС системы. Среда разработки играет ключевую роль в создании и поддержании функциональности системы, обеспечивая удобные средства для программирования и отладки.

Создание Векторной Карты в ГИС системе предоставляет пользовательскую возможность создания векторных карт с учетом различных параметров, таких как масштаб, классификатор, эллипсоид и тип карты. Пользователь выбирает место для хранения карты, определяет описание слоев и видов объектов, а также указывает параметры проекции и эллипсоида. Все это позволяет создавать уникальные и настраиваемые векторные карты в соответствии с конкретными потребностями и задачами.

Редактирование Объектов эффективно управляет процессом редактирования объектов на векторной карте, предоставляя разносторонний набор функций. Включает в себя не только основные действия, такие как выбор, перемещение, изменение атрибутов и удаление объектов, но и дополнительные возможности, такие как создание объектов по типу, добавление подобъектов, редактирование метрики и управление точками метрики. Это обеспечивает пользователю более широкий спектр инструментов для создания собственного редактора карт, что повышает гибкость и эффективность процесса редактирования.

### **Интерфейс системы**

Интерфейс разрабатываемой системы на рисунке 2 представляет собой интуитивно понятный и удобный инструмент для взаимодействия с геоинформационными данными. Он основан на простых и понятных элементах управления, обеспечивая пользователям легкий доступ к функционалу системы. Взаимодействие с картами, поиск объектов, анализ пространственных данных, а также создание собственных векторных карт осуществляются в несколько простых шагов.



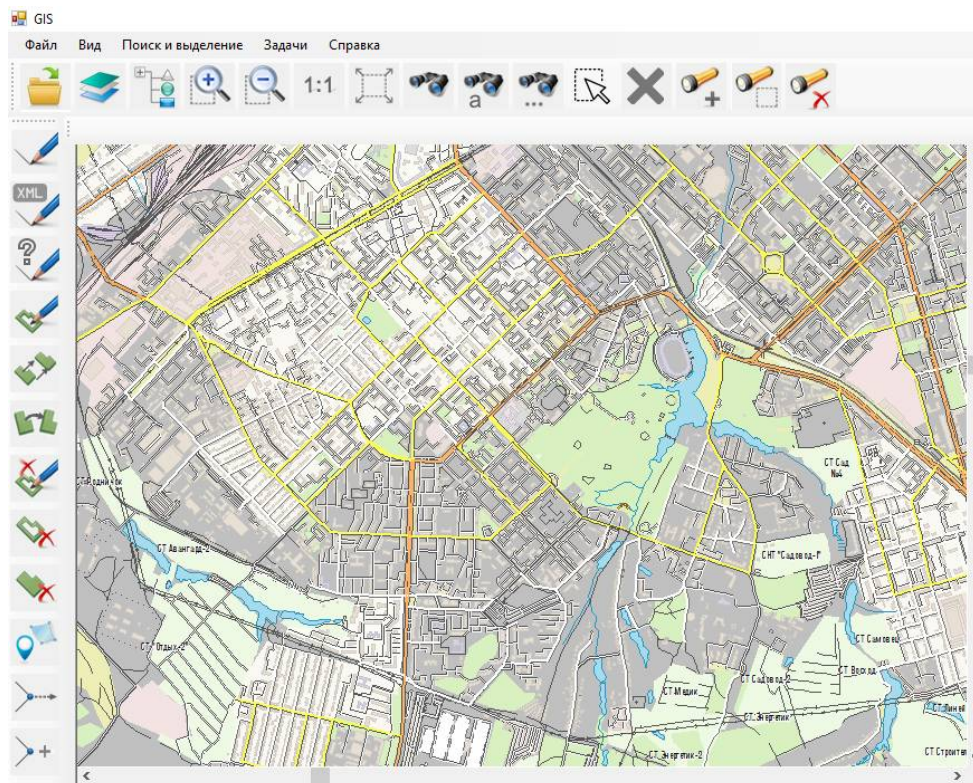


Рис. 2. Интерфейс разработанной системы

Основанный на принципах простоты и ясности, этот интерфейс призван обеспечить не только функциональность, но и удобство в использовании системы.

### Заключение

Разработанная система оснащена широким спектром инструментов, позволяющих выполнять основные геопространственные задачи — от базовых операций, таких как визуализация данных, геокодирование и пространственный анализ, до продвинутых функций, включая создания векторных карт и редактирование групп объектов. В систему планируется добавить функционал для работы с внешними базами данных и ГИС-серверами, а также реализовать возможность подключения к геопорталам. Весь функционал системы способствует более точному и глубокому анализу данных, что является фундаментальным для успешного выполнения геопространственных задач.

### Библиографический список

1. Шипулин В.Д. Основные принципы геоинформационных систем: Учебное пособие / Харьковская национальная академия городского хозяйства. — Харьков: ХНАГХ, 2010. — 337 с.
2. Принципы работы геоинформационных систем: учебное пособие / Под ред. С.И. Петрова. — Санкт-Петербург: Издательство СПбГУ, 2017. — 224 с.
3. Гуринов, Е. П. Основы геоинформационных систем / Е. П. Гуринов. — Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2017. — 272 с.
4. Геоинформационные технологии в экологии: учебное пособие / Под ред. В.А. Грачева. — Москва: Флинта, 2019. — 288 с.

УДК 004.032.26; ГРНТИ 47.47

## ТВОРЧЕСКИЙ СИМБИОЗ ЧЕЛОВЕКА И НЕЙРОННОЙ СЕТИ ПРИ СОЗДАНИИ ГРАФИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

А.С. Шерстюк

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, alsherst2002@mail.ru*

*Аннотация.* Современное искусство переживает революцию благодаря интеграции нейронных сетей в творческий процесс художников. Данная статья исследует инновационные подходы к искусству, представляя нейронную сеть не только как технологический инструмент, но и как творческого соавтора. Анализируя созданные иллюстрации, выявляются уникальные возможности, которые появляются при сотрудничестве художника и искусственного интеллекта. В статье рассматривается упрощение создания графических объектов и даётся ответ, можно ли доверять нейронной сети с выполнением рутинных задач?

## CREATIVE SYMBIOSIS OF HUMAN AND NEURAL NETWORK IN THE CREATION OF GRAPHIC OBJECTS

A.S. Sherstyuk

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, alsherst2002@mail.ru*

*The abstract.* Modern art is undergoing a revolution due to the integration of neural networks into the creative process of artists. This article explores innovative approaches to art, presenting the neural network not only as a technological tool, but also as a creative collaborator. Analyzing the created illustrations, the unique opportunities that appear with the collaboration of the artist and artificial intelligence are revealed. The article discusses the simplification of creating graphical objects and provides an answer, can a neural network be trusted to perform routine tasks?

Нейронные сети становятся все более популярными и доступными инструментами в самых разных областях, включая и творческую деятельность. Они уже успешно применяются в создании музыки для исполнителей, текстов для писателей и даже генерации изображений. Одна из интересных областей применения нейронных сетей – помощь художникам в создании работ разной сложности. Традиционно, создание работы требует от художника навыков рисования и длительного пополнения визуальной библиотеки. Однако, с прогрессом компьютерных систем и искусственного интеллекта, теперь художники могут воспользоваться нейронными сетями для создания уникальных и впечатляющих эскизов.

Одной из главных преимуществ использования нейронных сетей для создания работ является их способность генерировать уникальные и оригинальные изображения. Она может объединять различные стили или элементы из нескольких изображений, чтобы создать что-то новое и уникальное.

### *Особенности работы нейронных сетей*

В настоящее время нейронным сети находятся очень далеко от человеческого мозга, плане имитации его работы, и не способны справляться сами с настоящими творческими задачами. Тем не менее у них всё же есть некоторые преимущества и успехи в этой области. Их качество напрямую зависит от вычислительной мощности аппаратного обеспечения. Название технологии говорит о том, что подобные сети пытаются подражать принципам работы нейронов человеческого мозга [1]. Чем больше синаптических связей в нейроне, тем качественнее и быстрее он работает.

На данный момент большинство нейронных сетей для генерации графических объектов используют свободную лицензию, поэтому их работы можно использовать в различных проектах, не опасаясь авторских прав. Такая политика позволяет создавать свои графические элементы без специальных знаний и, почти, без вложения средств и времени.

*Диффузионные Нейронные сети — самый актуальный подход к генерации изображений*



Диффузионные модели представляют собой мощный класс алгоритмов для генерации изображений, основанных на стохастическом процессе диффузии. Они получили широкое признание в области искусственного интеллекта и компьютерного зрения благодаря своей способности генерировать высококачественные и реалистичные изображения.

Основной концепцией диффузионных моделей является моделирование вероятности появления пикселя в зависимости от его предыдущего состояния [2]. В процессе диффузии каждый пиксель обновляется с учетом его текущего состояния и случайного шума. Этот процесс повторяется многократно, создавая последовательность состояний, которая в итоге приводит к генерации изображения [3].

На сегодняшний день существует несколько видов архитектурных решений диффузионных нейронных сетей, среди них Stable Diffusion.

Структура Stable Diffusion включает в себя несколько моделей и элементов.

Наиболее важными элементами являются Распознаватель текста (Text Understanding), этот модуль предназначен для понимания входного текста и преобразование текстовой информации в цифровое представление; далее эта информация передается Генератору изображения (Image Generator).

Работа Генератора изображений производится в два этапа:

Создание информации изображения (Image Information Creator). Данный элемент выполняется в несколько шагов (step) для генерации информации об изображении. Этот этап по созданию информации об изображении работает в пространстве создания изображения или в скрытом пространстве. Благодаря этому свойству работа по генерации значительно ускорена, если сравнивать с предыдущими диффузионными моделями, которые работали в пиксельном пространстве. Диффузия (Diffusion) – обработка информации, которая производится в несколько шагов или итераций, которая в конечном результате приводит к созданию изображения с высоким качеством (при помощи декодера изображения).

Декодер изображений (Image Decoder). Декодер изображений генерирует графический объект на основе информации, полученной на этапе создания информации.

*Диффузионный процесс*

Сам диффузионный процесс выполняется на этапе создания информации об изображении. Введённый текст представляется в виде токенов, описывающих информацию запроса, также создается начальный массив информации изображения, в результате чего генерируется массив информации, который используется декодером изображения для производства конечного графического объекта. Процесс выполняется в несколько проходов и с каждым проходом или шагом в изображение добавляется всё больше и больше подходящей и нужной информации.

Для большей наглядности приведённого процесса продемонстрируем генерацию от 1 до 10 шага, так как в них наиболее заметные преобразования в генерируемом графическом объекте. В генерации каждого такого изображения участвует случайное зерно, которое отвечает за уникальность выходного результата.



Рис. 1. Демонстрация этапов генерации

Архитектура Stable Diffusion практически не ограничена в контенте, который она способна генерировать [4]. В связи с этим от неё можно добиться графических объектов разного спектра задач, от иллюстраций для книг в более художественном стиле, до вполне реалистичных и правдоподобных изображений людей.

### Творческий симбиоз

Допустим перед нами стоит задачи создать иллюстрацию для книги. Пусть целью иллюстрации будет заяц-космонавт. Оставим эту задачу на нейронную сеть и оценим её работу, для этого дадим текстовый запрос: “заяц-космонавт, космос, цифровой рисунок, иллюстрация” (рисунок 1).



Рис. 2. Набор иллюстраций, предложенный нейронной сетью



Рис. 3. Эталонная работа

Из представленных вариантов первый кажется наиболее подходящим под описанную задачу. Установим для этого варианта больше шагов генерации для получения более качественного изображения, с ним будет осуществляться дальнейшая работа (рисунок 2).

Данный результат вполне удовлетворяет требованиям, однако необходимо избавиться от деформации и немного поработать в графическом редакторе (рисунок 4).



Рис. 4. Редактирование полученного результата человеком

После небольшого редактирования самых заметных дефектов иллюстрация стала выглядеть лучше. Искажения всё ещё можно обнаружить при рассмотрении, но при беглом осмотре всё выглядит вполне приемлемо.

В заключение можно выделить, что творческий симбиоз между человеком и нейронными сетями в процессе создания графических объектов представляет собой уникальную область, в которой объединяются человеческое вдохновение и технологический прогресс.

Представленный анализ свидетельствует о том, что совместное творчество человека и нейронных сетей не только улучшает и упрощает процессы создания графических объектов, но также способствует развитию самого творческого процесса. Нейронные сети вполне могут справиться с рутинной работой с минимальным контролем со стороны человека.

### Библиографический список

1. Бережнов Н.И., Сирота А.А. Универсальный алгоритм улучшения изображений с использованием глубоких нейронных сетей // Вестник Воронежского государственного университета. Сер.: Системный анализ и информационные технологии. 2022. № 2. С. 81-92.
2. Siddiqui J. Rafid. Diffusion Models Made Easy. PhD, 2022. URL: <https://towardsdatascience.com/diffusion-models-made-easy-8414298ce4da> (дата обращения: 23.11.2022).
3. Левин А.О., Белов Ю.С. Использование генеративно-сопоставительных сетей для генерации изображений по тексту // Научное обозрение. Технические науки. 2023. № 2. С. 11-15.
4. Дроздов Д.С., Белов Ю.С. Обзор подходов к построению моделей для генерации изображений по текстовому описанию // В сборнике: Фундаментальные и прикладные исследования. Актуальные проблемы и достижения. сборник статей всероссийской научной конференции. Санкт-Петербург, 2023. С. 28-30.

УДК 004.413; ГРНТИ 20.51.17

## РАЗРАБОТКА ПОДСИСТЕМЫ АНАЛИЗА ПЛАТЕЖНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ АБОНЕНТОВ ПРЕДПРИЯТИЙ ЖКХ

**А.В. Маркин, В.И. Юркова**

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань*

*Аннотация.* В работе рассматривается решение задачи автоматизации процесса оценки финансовой способности абонентов вовремя оплачивать коммунальные услуги. Осуществляется разработка информационного и математического обеспечения автоматизированной подсистемы анализа платежной дисциплины абонентов предприятий ЖКХ.

*Ключевые слова:* подсистема, анализ данных, платежная дисциплина.

## DEVELOPMENT OF A SUBSYSTEM FOR ANALYZING THE PAYMENT DISCIPLINE OF SUBSCRIBERS OF HOUSING AND COMMUNAL SERVICES ENTERPRISES

**A.V. Markin, V.I. Yurkova**

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russian Federation, Ryazan*

*Annotation.* The paper considers the solution to the problem of automating the process of assessing the financial ability of subscribers to pay for utilities on time. For this purpose, the task is to develop information and mathematical support for an automated subsystem for analyzing the payment discipline of subscribers of housing and communal services enterprises.

*Keywords:* subsystem, data analysis, payment discipline.

### Цель работы

Платежная дисциплина абонента (потребителя ресурсов ЖКХ) заключается в своевременной оплате за коммунальные услуги, такие как электричество, вода, газ, отопление и другие услуги, предоставляемые жилищно-коммунальными службами. Соблюдение платежной дисциплины потребителями помогает обеспечить стабильное функционирование жилищно-коммунальной инфраструктуры, обеспечивая финансирование для обслуживания и

развития коммунальных услуг. Нарушение платежной дисциплины со стороны потребителей может привести к проблемам в обеспечении качественных услуг и финансовым затруднениям для организаций, предоставляющих ЖКУ.

Целью настоящей работы является автоматизация процесса оценки финансовой способности абонентов оплачивать коммунальные услуги. В соответствии с целью ставится задача на разработку подсистемы, способной решить поставленную задачу.

Программный комплекс «Абонент+»

РПК «Абонент+» предназначен для автоматизации расчетов с физическими лицами (абонентами) за жилищно-коммунальные услуги для нужд ресурсоснабжающих и управляющих компаний. Он состоит из расчетных систем, установленных в различных ресурсоснабжающих и управляющих компаниях, а также в расчетнокассовых центрах, и платежной системы.

Расчетная система используется для оперативного учета, обработки и хранения исходных данных и вычисления на их основе размеров платы за потребленные коммунальные ресурсы и оказанные услуги.

Платежная система является интегрированным решением, обеспечивающим online взаимодействие между всеми компонентами комплекса [1]. В системе реализованы прием, буферизация, маршрутизация и отправка следующих типов данных:

- данные о платежах;
- данные о текущем состоянии лицевого счетов;
- данные об изменениях лицевого счетов абонентов;
- информационные сообщения.

Разрабатываемая в рамках настоящей работы подсистема является частью программного комплекса «Абонент+». Его структура показана на рисунке 1.

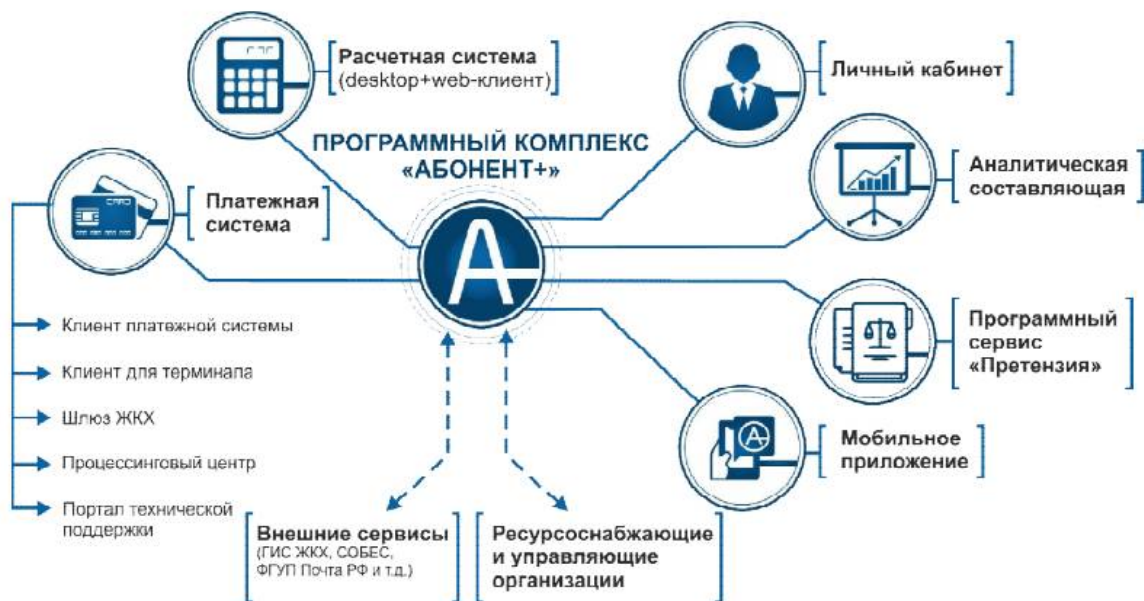


Рис. 1. Структура программного комплекса «Абонент+»

### Обзор существующих решений

Анализ платежной дисциплины широко применяется в различных сферах деятельности, где важно контролировать и оценивать своевременность оплаты задолженностей и обеспечить финансовую устойчивость. Особенно часто используется в финансовом секторе, включая банковскую деятельность, кредитные учреждения и страховые компании, а также в сфере торговли и предоставления услуг. Именно поэтому существует ряд готовых решений и



программных продуктов, которые специально разработаны для анализа и улучшения платежной дисциплины.

Готовые программные продукты не являются универсальными. Стоимость их внедрения и поддержки достаточно высока, что может быть непосильным для небольших организаций. Также, возможны сложности с интеграцией с существующими системами и данными, что может затруднить процесс внедрения и использования решения. Кроме того, некоторые готовые продукты могут не полностью соответствовать специфическим потребностям и требованиям конкретной организации, что потребует дополнительной настройки и модификации.

В качестве примера готовой системы можно привести программный продукт «Альт-Финансы» [2]. Данный инструмент анализа финансов уже зарекомендовал себя на рынке и обладает множеством преимуществ. Он позволяет рассчитать финансовые показатели и рейтинги, проводить факторный анализ данных, создавать отчеты и заключения. Но существенным недостатком этого решения является то, что все операции проводятся на базе MS Excel.

Подсистема анализа платежной дисциплины должна развиваться одновременно с программным комплексом путем изменения настроек параметров, ввода новых данных, изменения критериев оценки, выполняемых функций, требований и т.д., а так же путем использования новых инструментов, когда предыдущие утратят свою актуальность.

Создание такой системы удовлетворяет необходимость в проведении постоянного анализа данных, а не единичного получения результатов.

### Концептуальное описание подсистемы

Для решения поставленной задачи необходимыми шагами будут являться:

- обеспечить способы взаимодействия с базами данных Расчетной и Платежной систем;
- выбрать методику анализа исходных данных об абонентах и платежах;
- разработать программное решение для анализа данных математической формализации абонента;
- провести моделирующие и экспериментальные исследования разработанной методики.

Математическая формализация абонента подразумевает использование статистических методов (сводка данных по определенным признакам, создание рядов динамики, определение абсолютных относительных и средних величин), а также моделирования (создание моделей сложения, умножения, деления, расширения и сокращения факторов).

Концептуальная модель архитектуры подсистемы изображена на рисунке 2.

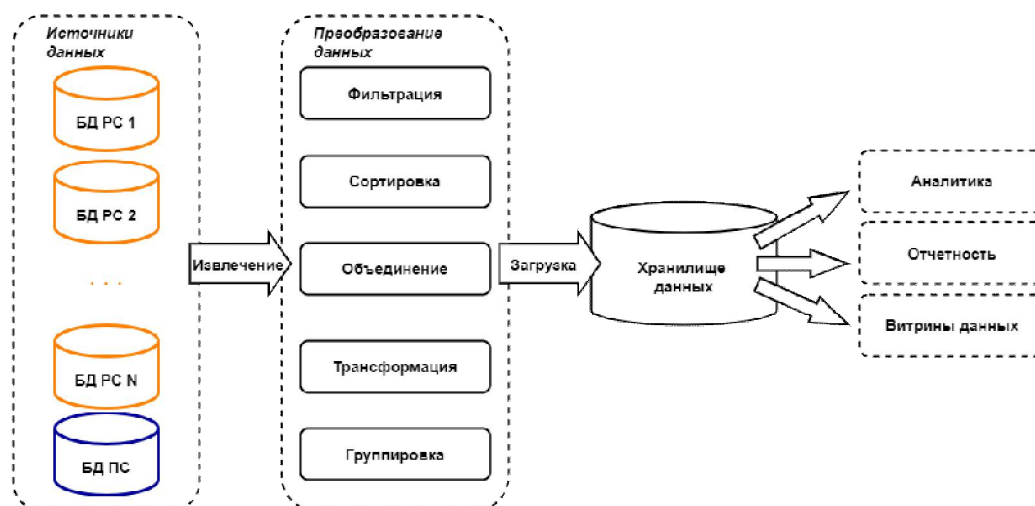


Рис. 2. Концептуальная модель структуры подсистемы

Предполагается создать автоматизированную подсистему, позволяющую выявить закономерности в изменениях показателей в предыдущих периодах и предсказать, как они будут вести себя в будущем.

С этой целью предлагается классифицировать абонентов в зависимости от их истории платежей следующим образом:

- абонент вовремя оплатит ЖКУ;
- абонент внесет оплату раньше времени;
- абонент частично задержит оплату;
- абонент задержит оплату полностью.

Для классификационной оценки абонента применяются классические подходы теории вероятностей по выявленным классификационным группам. Вероятность того, что абонент принадлежит  $n$ -ной классификационной группе,  $Kl_1 = P(n) = \frac{X}{N}$ , где  $X$  - количество клиентов из базы данных, отнесенных  $n$ -й в классификационной группе, а  $N$  - общее количество клиентов из базы данных в рассматриваемой выборке.

Исходя из имеющихся модулей и объектов концептуальной модели, разработана диаграмма компонентов подсистемы (рисунок 3). Данная диаграмма отображает состав подсистемы и демонстрирует зависимости компонентов.

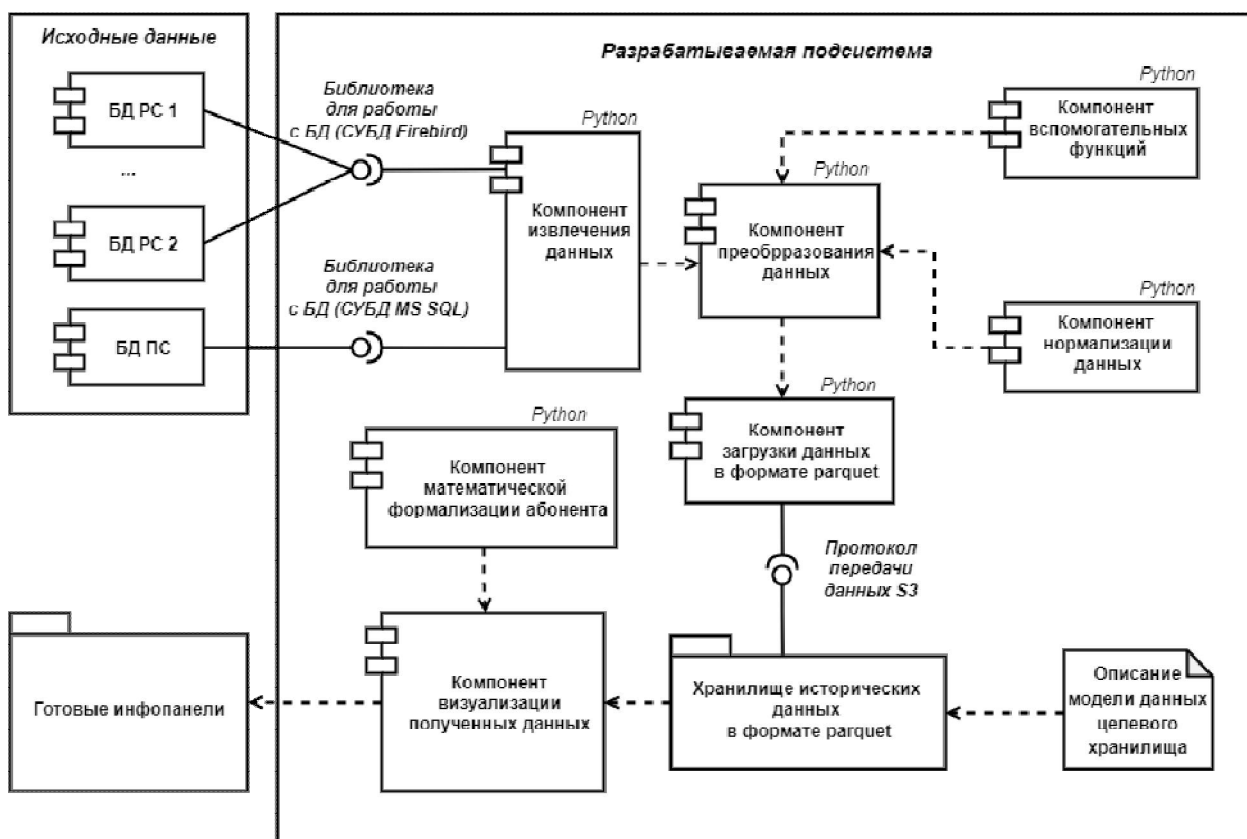


Рис. 3. Диаграмма компонентов подсистемы

Для работы с исходными базами данных, а также обработки полученных данных используются программные библиотеки на языке Python [3]. Они предназначены для работы с реляционными СУБД с применением технологии ORM и служат для синхронизации объектов Python и записей реляционной базы данных, а также позволяют описывать структуры баз данных и способы взаимодействия с ними на языке Python без использования SQL.

Полученная в ходе выгрузки и преобразования информация сохраняется в файлы формата parquet [4]. Он поддерживает неограниченное разнообразие типов данных и предназначен для гибкого и эффективного ввода-вывода, а также для обработки больших объемов дан-

ных. Для загрузки данных в общее хранилище используется протокол S3. Создание инфопанелей осуществляется компонентом визуализации данных Yandex DataLens [5].

Выводы. Созданы информационное и математическое обеспечения автоматизированной подсистемы анализа платежной дисциплины абонентов предприятий ЖКХ. Предполагается проведение классификации потребителей ЖКУ на основании истории платежей. Разрабатываемая подсистема позволит выявлять закономерности в изменениях показателей в предыдущих периодах и предсказат, как они будут вести себя в будущем.

### Библиографический список

1. Расчетно-платежный комплекс Абонент+ [Электронный ресурс]. - [https://www.abonent .plus/](https://www.abonent.plus/) - Режим доступа: [https://www.abonent.plus/knowledge\\_base\\_rpk](https://www.abonent.plus/knowledge_base_rpk), свободный (дата обращения: 15.12.2023).
2. Программное решение Альт-Инвест «Альт-Финансы» [Электронный ресурс]. - <https://www.alt-invest.ru/> - Режим доступа: <https://www.alt-invest.ru/program/alt-finance/>, свободный (дата обращения: 19.01.2024).
3. Python [Электронный ресурс] <https://www.python.org/> - режим доступа: <https://docs.python.org/3/reference/index.html>, свободный (дата обращения: 26.01.2024).
4. Что такое parquet? [Электронный ресурс]. - <https://vc.ru/> - Режим доступа: <https://vc.ru/newtechaudit/531223-cto-takoe-parquet-i-zachem-on-prigoditsya>, свободный (дата обращения 12.02.2024).
5. Гид по Yandex DataLens [Электронный ресурс]. - <https://www.unisender.com> - Режим доступа: <https://www.unisender.com/ru/blog/gid-po-yandex-datalens/>, свободный (дата обращения 19.02.2024).

УДК 004.89; ГРНТИ 20.23.21

## ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОЙ ЯЗЫКОВОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ОТВЕТОВ ЧАТ-БОТА ПРИ ОБУЧЕНИИ SQL

Е.М. Федотов

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, fedotov.eger@yandex.ru*

*Аннотация.* В работе рассматривается архитектура нейросетевой языковой модели трансформера, моделей семейства GPT (Generative Pre-trained Transformer). Также приводится описание алгоритмов их работы.

*Ключевые слова:* чат-бот, образование, современные технологии, нейросетевая языковая модель.

## APPLICATION OF THE NEURAL NETWORK LANGUAGE MODEL TO GENERATE CHAT-BOT RESPONSES WHEN LEARNING SQL

E.M. Fedotov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, fedotov.eger@yandex.ru*

*The summary.* The paper considers the architecture of the neural network language model of the transformer, models of the GPT (Generative Pre-trained Transformer) family. The algorithms of their operation are also described.

*Keywords:* chatbot, education, modern technologies, neural network language model.

В настоящее время наблюдается увеличение роли дистанционного обучения в процессе образования человека.

В статье [1] рассмотрено проектирование и разработка чат-бота, как вспомогательного словаря терминов при обучении SQL. На основе этой работы предлагается усовершенствовать алгоритм поиска и генерации ответов на запросы пользователей, путём внедрения в основную логику работы чат-бота нейросетевой языковой модели.

Выбор данного подхода обусловлен универсальностью применения его к различным предметным областям, компенсацией недостатков других подходов по поиску и генерации

ответов. Например, извлечение терминов на основе статистических показателей имеет недостаток в том, что при увеличении длины термина снижается его частота появления в тексте, и при установке низкого порога встречаемости сочетания слов для добавления их в контрольную группу значительно увеличивается избыточность и снижается точность выделения терминов. Извлечение терминов на основе правил характеризуются высокой точностью выделения нужных определений, но в большинстве случаев только для конкретного языка в силу особенностей его грамматики, а также требует участия эксперта по лингвистике и составления обширных словарей шаблонов предложений. Извлечение и определение терминологии с помощью методов машинного обучения требуют знаний для выбора подходящего метода обучения. А также такой подход предполагает наличие подходящего размеченного корпуса текстов, что не всегда возможно и требует значительный объем ручного труда.

В данной работе рассматривается архитектура нейросетевой языковой модели трансформера и модель семейства GPT (Generative Pre-trained Transformer) с описанием их алгоритмов работы.

### Описание нейросетевой языковой модели

Исходя из задачи по внедрению метода, который находит наиболее соответствующий ответ на запрос пользователя в процессе поиска определений, следует рассмотреть нейросетевые языковые модели, обучающиеся предсказывать следующее слово в тексте, учитывая предыдущий контекст [2].

Одними из самых продвинутых и популярных языковых моделей являются модели семейства GPT (Generative Pre-trained Transformer), в названии которого говорится о предварительно обученном трансформере, генерирующим текст.

Описание архитектуры трансформера

Для дальнейшего понимания работы модели GPT сначала следует описать архитектуру трансформера [3], структура которого представлена на рисунке 1.

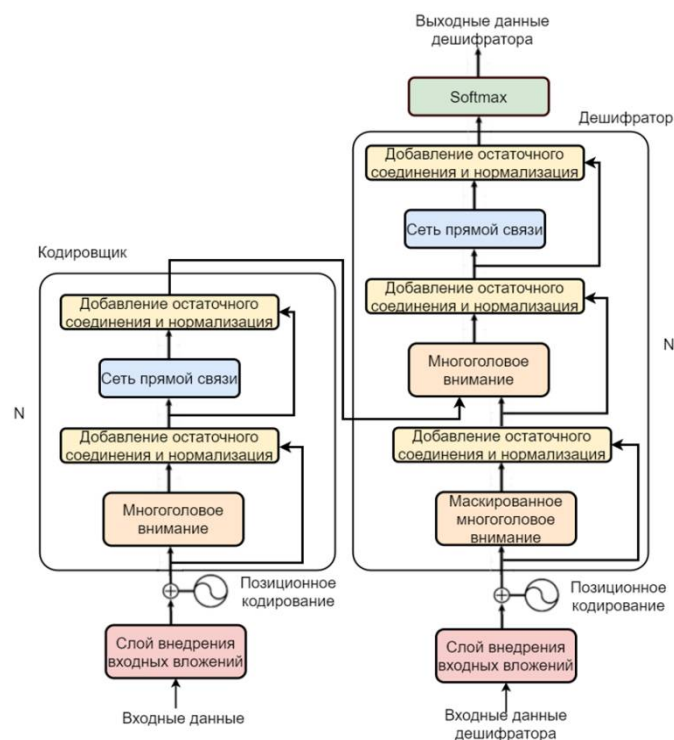


Рис. 1. Модель архитектуры трансформера

Модель архитектуры трансформера разделена на два структурных блока:

- кодировщик (левая сторона рисунка 1);
- дешифратор (правая сторона рисунка 1).



### Описание кодировщика

Цель кодировщика — сразу увидеть всю последовательность ввода и решить, какие токены (слова) важны, соответствующие другим токенам в последовательности, используя слой внимания.

«Входные данные» это числовое представление последовательности, которая должна быть преобразована. Например, необходимо перевести предложение «У меня есть машина» на английский. Поскольку текст напрямую не может использоваться в качестве входных данных для какой-либо нейронной сети, то генерируется числовое представление для каждого токена (У, меня, есть, машина) с использованием токенизатора, которое передается кодировщику.

«Слой внедрения входных вложений». Нейронные сети обучаются с помощью чисел, поэтому каждое слово сопоставляется вектору с непрерывными значениями, представляющими это слово. Данный слой помогает создавать значимые векторы размером  $d_{model} = 512$  для каждого токена. Следовательно, если числовое представление предложения «У меня есть машина» это, например, [1,2,3,4], тогда после слоя встраивания ввода он будет иметь размер  $4 \times 512$  (1 вектор размером 512 для каждого слова).

Хотя вложения, созданные во входных слоях встраивания, помогают определить, насколько похожи два слова, обычно это не учитывает их положение. Для решения данной проблемы необходимо добавить некоторую информацию о позициях во входные вложения. Это делается с применением позиционного кодирования. Авторы статьи [4] предлагают использовать в этих целях функции синуса и косинуса:

$$\begin{aligned} PE_{(pos,2i)} &= \sin(pos / 10000^{2i/d_{model}}) \\ PE_{(pos,2i+1)} &= \cos(pos / 10000^{2i/d_{model}}) \end{aligned} \quad (1)$$

где  $pos$  – позиция.

Для каждого нечетного индекса во входном векторе создаётся вектор, использующий функцию косинуса, а для каждого четного индекса — используется функция синуса. Затем эти векторы добавляются в соответствующие им входные вложения. Это успешно предоставляет информацию о положении каждого вектора.

После проведения позиционного кодирования обработанные данные поступают в ядро кодировщика (рис. 2), состоящее из 4 сегментов, которые повторяются в течение «N» раз.

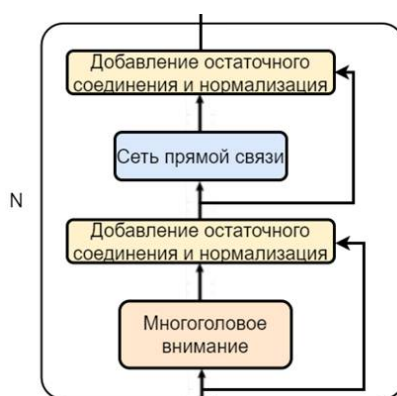


Рис. 2. Ядро кодировщика

Уровень внимания с несколькими головами (Multi-Head Attention). Внимание — это механизм, который динамически придает важность нескольким ключевым токенам во входной последовательности путем изменения вложений токенов [4].

В любом предложении есть несколько ключевых слов, которые содержат его суть. Например, в предложении «У меня есть машина» слово "машина" имеет большее значение,

чем предлог "У", когда дело доходит до понимания смысла предложения. Таким образом, чтобы модель фокусировалась на важных словах предложения, слой внимания очень удобен и улучшает качество результатов, получаемых нейронными сетями [4].

Многоголовое внимание в кодировщике использует особый механизм внимания, называемый самовниманием. Самоконтроль позволяет моделям связывать каждое слово во входных данных с другими словами.

Внимание к себе обрабатывается по пути каждого токена в сегменте. Значимыми компонентами являются три вектора.

Запрос: запрос представляет собой представление текущего слова, используемого для сравнения со всеми другими словами.

Ключ: ключевые векторы подобны меткам для всех слов в сегменте. Это то, с чем мы сопоставляем в нашем поиске подходящих слов.

Значение: векторы значений — это фактические представления слов, после того, как мы оценили, насколько актуально каждое слово, это значения, которые мы суммируем, чтобы представить текущее слово.

После подачи запроса, ключа и вектора значений через линейный слой запросы и ключи подвергаются матричному умножению для получения матрицы оценок (рис. 3).

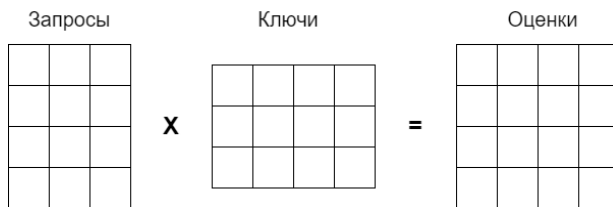


Рис. 3. Вычисление матрицы оценок

Матрица оценок определяет, какое внимание следует уделять слову в зависимости от других слов. Таким образом, каждое слово будет иметь оценку, соответствующую другим словам на временном шаге. Чем выше оценка, тем больше внимания. Затем оценки уменьшаются путем деления на квадратный корень из размера запроса и ключа. Это делается для обеспечения более стабильных градиентов, поскольку умножение значений может иметь взрывные эффекты. Затем необходимо применить функцию Softmax от масштабируемой оценки, чтобы получить веса внимания, которые дают значения вероятности в диапазоне от 0 до 1:

$$\text{Softmax}(x)_i = \frac{e^{x_i}}{\sum_{j=1}^n e^{x_j}}, \quad (2)$$

где  $i$  – индекс элемента,  $n$  – размерность строки-вектора в матрице оценок.

При выполнении Softmax более высокие оценки повышаются, а более низкие снижаются. Это позволяет модели быть более уверенной в том, какие слова следует использовать.

После этого веса внимания умножаются на вектор значений, чтобы получить выходной вектор (рис. 4). Чем выше баллы softmax, тем важнее значение слов, которые запоминает модель. Более низкие оценки заглушат неуместные слова.



Рис. 4. Вычисление выходных значений

Чтобы сделать многоголовое вычисление внимания, необходимо разделить вектора запроса, ключа и значения на  $N$  векторов, прежде чем применять алгоритм внимания к себе. Затем разделенные векторы проходят процесс самоконтроля индивидуально. Каждый процесс самонаблюдения называется головой. Каждая голова создает выходной вектор, который объединяется в единый вектор перед прохождением через конечный линейный слой.

Многоголовое внимание — это модуль в сети трансформера, который вычисляет веса внимания для входных данных и создает выходной вектор с закодированной информацией о том, как каждое слово должно относиться ко всем другим словам в последовательности [4].

Затем многоголовый выходной вектор внимания добавляется к исходному вложению позиционного ввода. Это называется остаточным соединением. Вывод остаточного соединения проходит через нормализацию уровня.

Нормализованный остаточный выходной сигнал проецируется через сеть прямой связи, состоящей из 2-х слоев, использующих ReLU, для дальнейшей обработки [4]. После этого выходные данные снова добавляются к входным данным сети прямой связи и далее нормализуются. Остаточные соединения помогают сети обучаться, позволяя градиентам проходить через сети напрямую. Нормализация уровня используется для стабилизации сети, что приводит к существенному сокращению необходимого времени обучения.

Это завершает уровень кодирования. Все эти операции предназначены для кодирования входных данных в непрерывное представление с информацией о внимании. Это поможет декодеру сосредоточиться на соответствующих словах во входных данных в процессе декодирования. Складывание кодировщика  $N$  раз позволяет каждому уровню изучать различные представления внимания, что потенциально повышает прогностическую мощь сети трансформера [4].

#### Описание дешифратора

Работа дешифратора заключается в генерации текстовых последовательностей. Дешифратор имеет подуровень, аналогичный кодировщику. В нём есть два многоголовых уровня внимания, нейронная сеть прямой связи и остаточные соединения, а также нормализация уровня после каждого подуровня. Эти подуровни ведут себя аналогично слоям в кодировщике, но каждый многоголовый уровень внимания выполняет свою работу. Блок дешифратора представлен на рисунке 5.

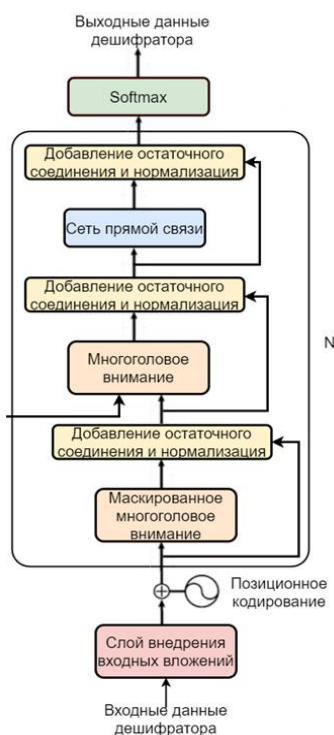


Рис. 5. Блок дешифратора

Дешифратор является авторегрессивным, он начинается с маркера запуска и принимает список предыдущих выходов в качестве входных данных, а также выходные данные кодировщика, которые содержат информацию о внимании из входных данных. Дешифратор прекращает декодирование, когда генерирует маркер завершения.

Начало работы дешифратора практически такое же, как и кодировщика. Входные данные проходят через слой встраивания и слой позиционного кодирования для получения позиционных вложений. Позиционные вложения подаются в первый слой внимания с несколькими головами, который вычисляет оценки внимания для ввода дешифратора.

Маскированное многоголовое внимание (Masked Multi-Head Attention) — модуль дешифратора, который работает с несколькими отличиями от обычного многоголового внимания. Поскольку дешифратор является авторегрессивным и генерирует предложение слово за словом, то необходимо предотвратить его привязку к будущим токенам. Например, для предложения «У меня есть машина» при вычислении показателей внимания слова «меня» у многоголового внимания не должно быть доступа к слову «есть», потому что это слово является будущим словом, которое будет сгенерировано после. Слово «меня» должно иметь доступ только к самому себе и словам перед ним. Для этого необходим метод, предотвращающий вычисление показателей внимания для будущих слов. Такой метод называется маскированием. Чтобы дешифратор не просматривал токены (слова) будущего, требуется применять маску «взгляд вперед».

Маска представляет собой матрицу того же размера, что и показатели внимания, заполненную значениями 0 и отрицательными бесконечностями. Когда маска добавляется к масштабируемым показателям внимания, в результате получается матрица оценок с верхним правым треугольником, заполненным отрицательными бесконечностями (рис. 6).

Веса внимания	+	Маска	=	Замаскированные веса внимания																																																
<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td>0.7</td><td>0.1</td><td>0.1</td><td>0.1</td></tr> <tr><td>0.1</td><td>0.6</td><td>0.2</td><td>0.1</td></tr> <tr><td>0.1</td><td>0.1</td><td>0.6</td><td>0.2</td></tr> <tr><td>0.1</td><td>0.3</td><td>0.3</td><td>0.3</td></tr> </table>	0.7	0.1	0.1	0.1	0.1	0.6	0.2	0.1	0.1	0.1	0.6	0.2	0.1	0.3	0.3	0.3	+	<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td>0</td><td>-inf</td><td>-inf</td><td>-inf</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>-inf</td><td>-inf</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>-inf</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> </table>	0	-inf	-inf	-inf	0	0	-inf	-inf	0	0	0	-inf	0	0	0	0	=	<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td>0.7</td><td>-inf</td><td>-inf</td><td>-inf</td></tr> <tr><td>0.1</td><td>0.6</td><td>-inf</td><td>-inf</td></tr> <tr><td>0.1</td><td>0.1</td><td>0.6</td><td>-inf</td></tr> <tr><td>0.1</td><td>0.3</td><td>0.3</td><td>0.3</td></tr> </table>	0.7	-inf	-inf	-inf	0.1	0.6	-inf	-inf	0.1	0.1	0.6	-inf	0.1	0.3	0.3	0.3
0.7	0.1	0.1	0.1																																																	
0.1	0.6	0.2	0.1																																																	
0.1	0.1	0.6	0.2																																																	
0.1	0.3	0.3	0.3																																																	
0	-inf	-inf	-inf																																																	
0	0	-inf	-inf																																																	
0	0	0	-inf																																																	
0	0	0	0																																																	
0.7	-inf	-inf	-inf																																																	
0.1	0.6	-inf	-inf																																																	
0.1	0.1	0.6	-inf																																																	
0.1	0.3	0.3	0.3																																																	

Рис. 6. Применение маски

Использование маски позволяет после применения Softmax из замаскированных оценок, у которых отрицательные бесконечности, получать нулевые значения, оставляя тем самым нулевые оценки внимания для будущих токенов.

Операция маскирование — единственное отличие в том, как рассчитываются показатели внимания в первом многоголовом слое внимания. Этот слой по-прежнему имеет несколько голов, к которым уже применяется маска, прежде чем они будут объединены и переданы для дальнейшей обработки. Результатом первого многоглавого внимания является замаскированный выходной вектор.

Для второго многоголового уровня внимания входными данными являются выходные данные от кодировщика и матрица запросов из предыдущего слоя внимания с несколькими замаскированными головами. Этот процесс сопоставляет выходные данные кодировщика с входными данными дешифратора, позволяя дешифратору решить, на каком входном сигнале кодировщика следует сосредоточить внимание. Результат второго многоглавого внимания проходит через нейронную сеть прямой связи, которая действует как классификатор. Размер классификатора равен количеству имеющихся классов. Например, если существует 10 000 классов для 10 000 слов, выходные данные этого классификатора будут иметь размер 10 000.

Затем выходные данные классификатора передаются в слой Softmax, который выдает оценки вероятности от 0 до 1. В результате берется индекс с наивысшей оценкой вероятности, и это равно предсказанному слову.

После этого дешифратор добавляет выходные данные в список своих входных данных и продолжает декодирование снова, пока не будет предсказан токен завершения.

Дешифратор также может быть уложен в  $N$  слоев, каждый слой принимает входные данные от кодировщика и слоев перед ним. Складывая слои, модель может научиться извлекать и фокусировать внимание на различных комбинациях внимания из своих голов внимания, потенциально повышая свою прогностическую способность [4].

#### Описание архитектуры генеративно предварительно обученного трансформера

Семейство моделей GPT (Generative Pre-trained Transformer) — это большие языковые модели на основе трансформера с миллиардами параметров, обученные на базе набора данных из нескольких миллионов веб-страниц. Модели GPT обучаются с простой целью: предсказать следующее слово, учитывая все предыдущие слова в некотором тексте [5].

Архитектура модели GPT (рис. 7) состоит из блоков дешифратора трансформера без второго уровня самоконтроля, которые уложены в  $N$  слоев и обрабатывающие входные токены последовательно на всех уровнях.

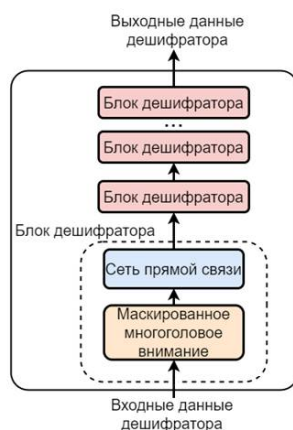


Рис. 7. Архитектура модели GPT

Начало работы модели такое же, как и дешифратора. Входные данные проходят через слой встраивания и слой позиционного кодирования для получения позиционных вложений, которые подаются в слой маскированного внимания с несколькими головами.

После этого первый блок может обрабатывать токен, сначала передавая его через процесс самоконтроля, а затем через уровень нейронной сети. Как только первый блок дешифратора обработает токен, он отправляет результирующий вектор на следующий уровень преобразования. Процесс обработки идентичен в каждом блоке, но каждый из них имеет свои собственные веса как в самоконтроле, так и в подуровнях нейронной сети [6].

Пусть при запуске модели, она имеет только один входной токен. Тогда он последовательно обрабатывается на всех уровнях, и пройдя все блоки дешифратора, создается результирующий вектор, который может быть сопоставлен со словарным запасом модели (все слова, которые знает модель, 50 000 слов в случае GPT-2) [6].

Затем при выходе из верхнего блока выбирается токен с наибольшей вероятностью, который в последующем добавляется к последовательности ввода.

При этом модель завершила итерацию, в результате чего было выведено одно слово. При этом каждый уровень GPT сохраняет свою собственную интерпретацию предыдущих токенов и будет использовать их при обработке последующих. Модель продолжает итерации до тех пор, пока не будет сгенерирован весь контекст или пока не будет создан токен конца последовательности [6].

### Заключение

Таким образом, в данной работе проведено описание архитектура нейросетевой языковой модели трансформера и модели семейства GPT (Generative Pre-trained Transformer), а также приведено описание алгоритмов их работы. Опыт применения моделей GPT показывает, что данная модель предоставляет больше возможностей по нахождению ответов на запросы пользователей, чем методы по извлечению терминов [7].

Проведение обучения модели GPT для узкой предметной области, например, получения знаний по SQL, на профессиональной литературе, предоставляемой её авторами, позволит наделить чат-бота узкоспециализированной информацией для генерации более точных и научно подтвержденных ответов. Помимо этого данный подход позволит снизить технические требования к аппаратному оборудованию, на котором планируется проведение обучения модели, поскольку отпадает потребность в обучении на огромном массиве всех источников, а идёт ориентация на литературу конкретной предметной области. В следствие чего размер модели GPT может быть уменьшен по сравнению с уже созданными нейросетевыми языковыми моделями, которые обучаются на основе всех доступных источников.

В перспективе предполагается разработать и произвести обучение модели GPT, генерирующей ответы на основе учебных материалов по SQL, и внедрить её в разработанного чат-бота [1].

### Библиографический список

1. Федотов Е.М. Чат-бот как вспомогательный словарь терминов при обучении SQL/ Е. М. Федотов // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2023 [текст]: сб. тр. VI междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.4./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. Ун-т, 2023. - С. 195-201
2. Чучупал В. Я. Способы уменьшения вычислительной сложности нейросетевых языковых моделей // Речевые технологии/Speech Technologies. 2020.
3. Terry A.R., Hoste V., Lefever E. HAMLET. Terminology, 2021, vol. 27, no. 2, pp. 254–293. DOI: 10.1075/term.20017.rig.
4. Attention Is All You Need / A.Vaswani, N. Shazeer, N. Parmar [и др.]. - NeurIPS, 2017.
5. Better language models and their implications [Электронный ресурс] / официальный сайт. — Режим доступа: <https://openai.com/research/better-language-models>, свободный (дата обращения 07.02.2024). — Загл. с экрана.
6. The Illustrated GPT-2 (Visualizing Transformer Language Models) [Электронный ресурс] / официальный сайт. — Режим доступа: <https://jalammr.github.io/illustrated-gpt2/>, свободный (дата обращения 11.02.2024). — Загл. с экрана.
7. Introducing GPT-4, OpenAI’s most advanced system [Электронный ресурс] / официальный сайт. — Режим доступа: <https://openai.com/>, свободный (дата обращения 14.02.2024). — Загл. с экрана.

УДК338.2 ГРНТИ 06.35.51

## ВНЕДРЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В СИСТЕМУ PERT

Е.А. Козлова

*Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны,  
Российская Федерация, Ярославль, kelen453@gmail.com*

**Аннотация.** Статья исследует интеграцию нейронных сетей в систему управления проектами PERT. Автор предлагают новый подход, используя искусственный интеллект для повышения точности прогнозирования времени и ресурсов проектов. Результаты экспериментов с реальными данными демонстрируют улучшенные возможности оптимизации графиков задач. Программа оценки и ревизии, используемая для управления проектами и планирования времени, основанный на графовых моделях. Эта работа представляет новые перспективы для эффективного управления проектами в динамичных условиях, предоставляя ценные научные выводы для профессионалов в области управления проектами и исследователей в области искусственного интеллекта.

**Ключевые слова:** нейронная сеть, прогнозирование времени выполнения проектов, использование нейронной сети, программа оценки и ревизии

## IMPLEMENTATION OF NEURAL NETWORKS INTO THE PERT SYSTEM

E.A. Kozlova

Yaroslavl Higher Military School of Air Defense,  
Russian Federation, Yaroslavl, kelena453@gmail.com,

*Abstract.* The article explores the integration of neural networks into the PERT project management system. The author suggests a new approach using artificial intelligence to improve the accuracy of forecasting time and resources of projects. The results of experiments with real data demonstrate improved possibilities for optimizing task schedules. An evaluation and revision program used for project management and time planning based on graph models. This work presents new perspectives for effective project management in a dynamic environment, providing valuable scientific insights for project management professionals and researchers in the field of artificial intelligence.

*Keywords:* neural network, project execution time forecasting, neural network usage, evaluation and revision program.

Выбор архитектуры нейронной сети зависит от конкретной задачи, типа данных и объема информации, доступной для обучения. Для задачи прогнозирования времени выполнения проектов в системе PERT, можно рассмотреть следующие типы архитектур:

1. Рекуррентные нейронные сети (RNN) или LSTM, которые подходят для обработки последовательных данных, таких как временные ряды, что может быть важно при анализе хода проекта. Эти архитектуры могут учесть зависимости во времени между задачами и предсказать временные оценки.

2. Сверточные нейронные сети (CNN) удобно использовать, если у вас есть визуальные данные или данные с пространственной структурой, например, графы задач и их зависимости, CNN может быть полезной. Она может извлекать важные признаки из визуальных представлений данных.

3. Гибридные модели, комбинирующие различные типы слоев и архитектур для улучшения обучения. Например, можно сочетать RNN и CNN для работы с последовательными и визуальными данными одновременно.

4. Attention-механизмы, которые могут быть полезны для выделения важных частей данных при прогнозировании времени выполнения задач. Это позволяет сети фокусироваться на ключевых аспектах проекта.

5. Глубокие нейронные сети (DNN) при наличии большого объема данных и достаточные ресурсы.

6. Можно воспользоваться техникой Transfer Learning, используя предварительно обученные модели на похожих задачах, а затем донастраивая их на ваших данных.

Выбор архитектуры также может зависеть от вашего опыта, доступных вычислительных ресурсов и времени на обучение. Рекомендуется провести несколько экспериментов с разными архитектурами и параметрами, чтобы определить наилучший вариант для вашей конкретной задачи.

Программа оценки и ревизии технологии (PERT) - это метод, используемый для управления проектами и планирования времени, основанный на графовых моделях. Граф, используемый в PERT, обычно представляет собой ориентированный ациклический граф (ОАГ), где узлы представляют события (завершение задачи) и направленные ребра - последовательность задач. Использование графов в PERT облегчает визуализацию проекта, анализ зависимостей и управление временными ресурсами, что делает этот метод полезным инструментом в области планирования и управления проектами.

Внедрение нейронных сетей в систему PERT может улучшить прогнозирование времени выполнения задач, оптимизировать распределение ресурсов и повысить точность предсказания завершения проекта. Вот несколько способов, как можно использовать нейронные сети в системе PERT: прогнозирование времени выполнения задач, оптимизация распределения ресурсов, управление рисками, адаптивное управление проектом, оптимизация критического пути [1].



Сбор тренировочной и тестовой выборок для обучения нейронной сети в системе PERT (или любой другой задачи) необходимо проводить по следующему алгоритму:

1. Определить, какие задачи нейронная сеть должна выполнять. Например, если вы хотите прогнозировать временные оценки задач, убедитесь, что ваши данные содержат информацию о времени выполнения задач.

2. Использовать исторические данные прошлых проектов. Эти данные должны содержать информацию о задачах, времени выполнения, зависимостях между задачами, событиях, связанных с рисками, и любых других факторах, которые вы считаете важными.

3. Очистить и структурировать данные. При этом убедиться, что данные в формате, который легко понимает и обрабатывает ваша нейронная сеть. Произведите кодирование категориальных переменных, обработайте

4. Разделить данные на тренировочную и тестовую выборки. Распределите данные так, чтобы обе выборки были репрезентативными по отношению к различным аспектам проекта.

5. Если есть данные с временным измерением (например, история проекта от начала до конца), важно сохранить эту временную структуру при делении выборки.

6. Если классы (категории задач, например) несбалансированы, удостовериться, что обе выборки содержат адекватное представление каждого класса. Также необходимо учесть случайность при разделении данных.

7. Определить, что будет являться целевой переменной для данной модели. Например, это может быть фактическое время выполнения задачи, риск, связанный с задачей, или что-то еще.

8. Визуализировать данные, проанализировать распределения и взаимосвязи между переменными. Убедиться, что ваши выборки отражают реальные характеристики задач и проектов.

9. Резервировать тестовую выборку для финальной оценки.

Соблюдение этих шагов поможет вам подготовить качественные тренировочную и тестовую выборки для обучения нейронной сети в системе PERT.

Выбор архитектуры также может зависеть от вашего опыта, доступных вычислительных ресурсов и времени на обучение. Рекомендуется провести несколько экспериментов с разными архитектурами и параметрами, чтобы определить наилучший вариант для вашей конкретной задачи [2].

Управление рисками в проекте является критическим компонентом, поскольку позволяет выявить потенциальные проблемы и предпринять шаги для их минимизации или предотвращения. Использование нейронных сетей может улучшить этот процесс следующим образом:

- Идентификация рисков. (Нейронные сети могут быть обучены на исторических данных проектов для выявления паттернов, которые указывают на возможные риски.) Это может включать в себя анализ задач, зависимостей, использование ресурсов и других факторов.

- Оценка вероятности и воздействия рисков. (Нейронные сети могут использоваться для разработки моделей, способных оценивать вероятность возникновения определенных рисков и их потенциальное воздействие на проект.) Это может помочь приоритизировать риски и выделить наиболее важные аспекты для управления.

- Разработка стратегий управления рисками. (На основе анализа, проведенного нейронной сетью, можно разрабатывать стратегии управления рисками.) Модели могут предложить рекомендации по смягчению рисков или даже автоматически вносить коррективы в план проекта для уменьшения воздействия рисков.

- Динамическое обновление моделей. (Нейронные сети могут быть обучены на реальных данных в режиме реального времени, что позволяет им адаптироваться к изменениям в проекте.) Это может включать в себя ввод новой информации, изменения в ходе выполнения задач и другие факторы, влияющие на риск.



• Автоматизация процессов управления рисками. (На основе предсказаний нейронной сети можно разрабатывать автоматизированные системы, которые могут принимать решения и даже внесение коррективов в план проекта без необходимости человеческого вмешательства).

Использование нейронных сетей для управления рисками в системе PERT позволяет сделать процесс более эффективным и адаптивным к изменяющимся условиям проекта, что в свою очередь способствует более успешному завершению проекта.

В заключении следует отметить, что внедрение нейронных сетей в систему PERT требует тщательной подготовки данных, обучения модели на исторических данных и постоянной корректировки, чтобы учесть изменения в ходе проекта.

### Библиографический список

1. Палагин, В. С. Управление проектами в условиях кризиса / В. С. Палагин, Е. У. Карлинская // Управление проектами и программами. – 2009. – № 3. – С. 210–220.

2. Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide) – Fifth Edition. An American National Standard ANSI/PMI 99-001-2013. – Project Management Institute, Inc., 2013

УДК 623.746.-519

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ОСНОВНЫХ ЭТАПОВ ОБУЧЕНИЯ УПРАВЛЕНИЮ БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ

**А.Р. Романов**

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, artur.romanoff707@gmail.com*

*Аннотация.* Статья посвящена анализу алгоритмов управления полетом беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с использованием методов машинного обучения. В работе рассмотрены основные принципы функционирования БПЛА, а также проблемы, возникающие при управлении ими. Проведен анализ различных алгоритмов машинного обучения и определены наиболее эффективные для конкретных задач управления БПЛА.

*Ключевые слова:* беспилотные летательные аппараты, БПЛА, управление полетом, анализ алгоритмов управления, машинное обучение.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF EXISTING ALGORITHMS FOR THE IMPLEMENTATION OF THE MAIN STAGES OF TRAINING IN THE MANAGEMENT OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

**A.R. Romanov**

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russian Federation, Ryazan, artur.romanoff707@gmail.com*

*Annotation.* The article is devoted to the analysis of flight control algorithms for unmanned aerial vehicles (UAVs) using machine learning methods. The paper considers the basic principles of UAV operation, as well as the problems that arise when controlling them. The analysis of various machine learning algorithms has been carried out and the most effective ones for specific UAV control tasks have been determined.

*Keywords:* unmanned aerial vehicles, UAVs, flight control, analysis of control algorithms, machine learning.

В современном мире беспилотные летательные аппараты (БПЛА) становятся все более популярными и широко используемыми в различных областях, таких как мониторинг окружающей среды, сельское хозяйство, строительство, транспорт и многие другие. Одним

из основных аспектов применения БПЛА является обучение управлению ими, которое включает в себя ряд этапов, каждый из которых требует особого внимания и разработки эффективных алгоритмов.

Цель данной статьи заключается в проведении сравнительного анализа существующих алгоритмов, используемых для реализации основных этапов процесса обучения управлению БПЛА. В ходе исследования будут рассмотрены такие этапы, как планирование траектории полета, стабилизация аппарата в воздухе, распознавание объектов на земле и принятие решений на основе полученной информации.

Актуальность данной темы обусловлена необходимостью постоянного совершенствования существующих алгоритмов и разработки новых, способных обеспечить эффективное и безопасное управление БПЛА в различных условиях эксплуатации. Кроме того, результаты проведенного анализа позволят определить наиболее перспективные направления для дальнейших исследований и разработок в области управления БПЛА.

В настоящее время существует множество алгоритмов для управления БПЛА, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки [1].

К наиболее распространенным алгоритмам относятся нижеописанные алгоритмы.

### **PID-алгоритм**

PID-алгоритм (пропорционально-интегрально-дифференциальный алгоритм) является одним из наиболее распространенных и эффективных методов управления беспилотными летательными аппаратами (БПЛА). Он позволяет стабилизировать БПЛА в воздухе и управлять его движением, используя информацию о текущем состоянии аппарата и его отклонениях от заданной траектории [2].

PID-алгоритм работает путем расчета управляющего воздействия на основе трех составляющих: пропорциональной, интегральной и дифференциальной. Пропорциональная составляющая учитывает текущее отклонение БПЛА от заданной траектории, интегральная составляющая накапливает информацию об отклонениях за все время полета, а дифференциальная составляющая учитывает скорость изменения отклонения.

На основе этих трех составляющих PID-алгоритм рассчитывает управляющее воздействие, которое затем передается на исполнительные механизмы БПЛА (двигатели, рули высоты и направления). Таким образом, PID-алгоритм позволяет автоматически корректировать положение и скорость БПЛА, чтобы удерживать его на заданной траектории и выполнять различные маневры.

Плюсы PID-алгоритма:

- Высокая точность управления: PID-алгоритм способен обеспечить очень точное управление БПЛА, благодаря своей способности учитывать текущее отклонение, историю отклонений и скорость изменения отклонения.
- Быстрая реакция на внешние воздействия: PID-алгоритм может быстро реагировать на изменения условий полета, такие как ветер или изменение нагрузки на аппарат.
- Простота реализации: PID-алгоритм относительно прост для понимания и реализации, что делает его доступным для широкого круга разработчиков систем управления БПЛА.

Минусы PID-алгоритма:

- Необходимость настройки параметров: PID-алгоритм требует настройки нескольких параметров, таких как коэффициенты пропорциональности, интегрирования и дифференцирования, что может быть сложным и требовать времени на настройку.
- Нестабильность в некоторых случаях: при неправильных настройках PID-алгоритм может стать нестабильным и вызвать колебания или даже потерю управления БПЛА.

### **Fuzzy Logic Control (FLC)**

Fuzzy Logic Control (FLC) - это метод управления БПЛА, основанный на использовании нечеткой логики. Он позволяет управлять аппаратом в условиях неопределенности и неполноты информации.

FLC использует лингвистические переменные, которые представляют собой набор значений, описывающих состояние системы. Например, переменная «высота» может иметь значения «низкая», «средняя» и «высокая».

Для каждого значения лингвистической переменной определяются функции принадлежности, которые определяют степень принадлежности к данному значению. Например, функция принадлежности для значения «низкая» может быть равна 1, если высота БПЛА равна 0 метров, и уменьшаться до 0 по мере увеличения высоты.

Затем на основе функций принадлежности вычисляются выходные значения, которые используются для управления БПЛА. Например, если функция принадлежности для значения «высокая» равна 0,5, то это означает, что высота БПЛА составляет около половины от максимально возможной.

FLC позволяет управлять БПЛА в условиях, когда точные значения переменных неизвестны или некорректны. Это может быть полезно при полете в сложных погодных условиях или при выполнении маневров на малых высотах [3].

Плюсы FLC:

- Нечеткая логика позволяет обрабатывать неточные и неполные данные, что может быть полезно в условиях плохой видимости или при выполнении сложных маневров.
- FLC может адаптироваться к изменениям в окружающей среде и поведении системы, что делает его более гибким и адаптивным, чем традиционные методы управления.

Минусы FLC:

- Сложность настройки: FLC требует настройки множества параметров, что может занять много времени и требует опыта в области нечеткой логики.
- Не всегда лучшая точность: в некоторых случаях FLC может давать менее точные результаты, чем другие методы управления.

### **Neural Network Control (NN)**

Neural Network Control (NN) - это алгоритм управления БПЛА, который использует нейронные сети для обработки данных с датчиков и определения оптимального управляющего воздействия. Алгоритм NN состоит из следующих этапов:

1. Сбор данных.
2. Обработка данных. Данные с датчиков обрабатываются и преобразуются в формат, удобный для использования нейронной сетью.
3. Обучение нейронной сети. На основе обработанных данных нейронная сеть обучается, то есть определяет зависимости между входными данными и желаемым управляющим воздействием.
4. Применение нейронной сети для управления БПЛА: После обучения нейронная сеть может использоваться для определения оптимального управляющего воздействия на БПЛА на основе поступающих данных [4].

Плюсы алгоритма NN:

- Нейросети способны обрабатывать большие объемы данных и находить сложные зависимости между входными и выходными данными.
- Алгоритм NN может адаптироваться к изменяющимся условиям и выполнять задачи в реальном времени.
- Нейронные сети способны обучаться на основе опыта и улучшать свое поведение со временем.

Минусы алгоритма NN:

- Сложность настройки и обучения нейронных сетей.

- Необходимость переобучения нейронной сети, когда она хорошо работает на обучающих данных, но плохо - на новых данных.

- Потребность в больших объемах данных для обучения нейронной сети.

Анализ существующих алгоритмов управления БПЛА показывает, что каждый из них имеет свои преимущества и недостатки, и выбор наиболее подходящего алгоритма зависит от конкретных требований к системе управления БПЛА.

### Библиографический список

1. Силаев, А. А. Разработка алгоритма по дистанционному управлению беспилотными объектами / А. А. Силаев, Н. А. Пузанов. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2012. — № 5 (40). — С. 89-92. — URL: <https://moluch.ru/archive/40/4859/> (дата обращения: 25.02.2024).

2. Что такое PID, на что влияет и как настроить. — URL:

<https://profpv.ru/chto-takoe-pid-na-chto-vliyaet-i-kak-nastroit/> (дата обращения: 25.02.2024)

3. Метод нечеткого регулятора (flc). — URL:

<https://studfile.net/preview/5682850/page:2/> (дата обращения: 25.02.2024)

4. Савицкий А.В., Павловский В.Е. Модель квадрокоптера и нейросетевой алгоритм

управления // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2017. № 77. 20 с. doi:10.20948/prepr-2017-77 URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2017-77>

УДК 004.413; ГРНТИ 20.53

## ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАЗРАБОТКИ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КОММУНАЛЬНОГО БИЛЛИНГА

**К.А. Краснов**

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, kirill.krasnov.2000@mail.ru*

*Аннотация.* В работе рассматриваются вопросы анализа данных коммунального биллинга. Поставлена проблема анализа данных мобильного приложения «Абонент+». Приводится обоснование необходимости решения проблемы. Обозреваются текущие решения и приводится обоснование необходимости разработки нового решения.

*Ключевые слова:* коммунальный биллинг, AppMetrica, Power BI, Greenplum, интеллектуальный анализ данных.

## TECHNICAL AND ECONOMIC JUSTIFICATION OF DEVELOPMENT INFORMATION AND ANALYTICAL SYSTEM OF PUBLIC BILLING

**K.A. Krasnov**

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, kirill.krasnov.2000@mail.ru*

*Annotation.* The paper discusses issues of analyzing utility billing data. The problem of analyzing mobile application data is posed

"Abonent+". The rationale for the need to solve the problem is given. Current solutions are reviewed and the rationale for developing a new solution is provided.

*Keywords:* utility billing, AppMetrica, Power BI, Greenplum, data mining.

### Введение

Современный мир, пронизанный технологиями и общением, переживает бурный рост объемов данных, порождаемых каждым шагом современного человека [1]. От социальных сетей до интернета вещей, информация становится одним из наиболее ценных ресурсов. В этой непрерывно меняющейся среде, интеграция больших данных и бизнес-аналитики приобретает особую значимость. Большие данные (Big Data) — это не только объемные наборы данных, но и комплексные, включающие в себя разнообразные типы информации, генери-

руемой с разной скоростью. Интеллектуальный анализ данных, в свою очередь, представляет собой процесс сбора, обработки и интерпретации данных для выявления ценных знаний.

Интеллектуальный анализ данных — это процесс сбора, обработки и интерпретации данных с целью выявления паттернов, трендов и закономерностей. Это помогает компаниям сформировать обоснованные решения и стратегии на основе фактов, а не предположений. Применение аналитики позволяет предсказывать рыночные тренды, адаптировать продукты и услуги под потребности клиентов, идентифицировать эффективность бизнес-процессов в различных областях, включая такие как коммунальный биллинг.

Коммунальный биллинг представляет собой процесс сбора и обработки платежей за коммунальные услуги, такие как электричество, газ, вода, отопление и канализация. Биллинговые системы используются для расчета стоимости услуг, учета платежей и предоставления информации о задолженности или переплате [2]. Жилищно-коммунальная сфера отличается значительной финансовой емкостью, что изначально определяет актуальность развития систем аналитики данных в этой области [3]. Значимость представленного направления усиливается в современных условиях. Это обусловлено установлением финансовой ответственности собственников многоквартирного фонда за состояние общего имущества, введением новых субъектов на рынок платежей за жилищно-коммунальные услуги.

### **Обзор процесса анализа данных**

Интеллектуальный анализ данных представляет собой процесс сбора, обработки и интерпретации данных с целью выявления паттернов, трендов и закономерностей, обнаружения скрытых закономерностей и тенденций в больших наборах данных. В интеллектуальном анализе данных применяется математический анализ для выявления закономерностей и тенденций, существующих в данных. Обычно такие закономерности нельзя обнаружить при традиционном просмотре данных, поскольку связи слишком сложны, или из-за чрезмерного объема данных.

Эти закономерности и тренды можно собрать вместе и определить, как модели интеллектуального анализа данных. Модели интеллектуального анализа данных могут применяться к конкретным сценариям, а именно:

- прогнозирование: оценка возможного объема платежей, прогнозирование нагрузки сервера или времени простоя сервера;
- риск и вероятность: выбор наиболее подходящих абонентов для целевой рассылки, определение точки равновесия для рискованных сценариев, назначение вероятностей диагнозам или другим результатам;
- поиск последовательностей: анализ выбора абонентов во время совершения операций в мобильном приложении, прогнозирование следующего возможного события;
- группирование: разделение абонентов или событий на когорты связанных элементов, анализ и прогнозирование общих черт.

### **Рассмотрение проблемы анализа данных коммунального биллинга в мобильном приложении**

Важность показателей возвращаемости пользователей в мобильное приложение обусловлена несколькими факторами:

- удержание пользователей - высокий уровень возвращаемости говорит о том, что пользователи довольны приложением и скорее всего будут продолжать его использовать. Это обеспечивает долгосрочное удержание пользователей, что важно для поддержания и роста пользовательской базы;
- оптимизация функций - знание того, какие функции приложения наиболее популярны среди возвращающихся пользователей, может помочь разработчикам оптимизировать приложение и увеличить его привлекательность для новых пользователей;

- сегментация аудитории - анализ данных о возвращающихся пользователях может помочь в сегментации аудитории и определении наиболее ценных сегментов для удержания.

В целом, показатели возвращаемости являются важными индикаторами успешности мобильного приложения и могут помочь в принятии решений на всех этапах разработки и продвижения приложения.

Существует система сбора и обработки данных мобильного приложения «Абонент+» использующая автоматический сбор данных и построение отчетов. Текущее решение не предоставляет полноценных возможностей для анализа показателей возвращаемости пользователей.

В качестве способа решения задачи анализа показателей возвращаемости пользователей в мобильное приложение может являться разработка информационно-аналитической системы коммунального биллинга.

### Обзор существующих решений

*AppMetrica* — это набор библиотек для сбора статистики использования приложения, для создания и ведения push-кампаний и сбора статистики по ним. Собранные данные можно просматривать в веб-интерфейсе AppMetrica.

AppMetrica включает в себя две основные библиотеки.

AppMetrica SDK — позволяет получать статистическую информацию о приложении и его пользователях. Например, информацию о сессиях, количестве пользователей, установивших приложение, источниках их переходов на страницу скачивания приложения и другое.

AppMetrica Push SDK — позволяет работать с push-уведомлениями и отслеживать ход push-кампании.

В текущем решении по мобильному приложению «Абонент+» собирается общая статистика по действиям пользователей и представлен ряд автоматических отчетов.

На основе автоматических отчетов невозможно провести полный анализ показателей возвращаемости пользователей на основе совершаемых платежей. Так же проблемой для анализа выступают расхождения в данных между автоматически собираемыми с мобильного приложения данными и данными в платежной системе.

*Microsoft Power BI* – это коллекция программных служб, приложений и соединителей, которые взаимодействуют друг с другом, чтобы превратить разрозненные источники данных в согласованные, визуально иммерсивные и интерактивные аналитические сведения.

В текущем решении аналитические отчеты на платформе Power BI собраны из данных платежной системы «Абонент +». На основе данных отчетов невозможно провести анализ показателей возвращаемости пользователей мобильного приложения, так как в отчетах содержится информация о всех совершаемых платежах со всех платформ.

### Предлагаемое решение

Разрабатываемый программный продукт представляет собой информационно-аналитическую систему, подсистему крупного программного комплекса, основной целью которой является обработка и анализ исходных данных мобильного приложения. Целевой ролью данной системы будет являться участие в процессе интеллектуального анализа данных коммунального биллинга по мобильному приложению.

Исходя из общего представления о аналитических системах и интеллектуальном анализе данных, можно сформулировать основные требования к системе:

- система должна обладать возможностью обработки исходных данных в соответствии с заданными параметрами;
- система должна иметь возможность формировать установленные отчетные формы.

Исходя из роли системы необходимо выделить основное допущение. Допускается, что система не сможет полностью заменить текущие решения, но сможет расширить возможно-

сти анализа данных коммунального биллинга по мобильному приложению, предоставив большее количество рассчитанных показателей.

### Постановка задачи на разработку информационно-аналитической системы коммунального биллинга

Ставится задача по расширению возможностей аналитики данных мобильного приложения.

Требуется реализовать функционал:

- просмотр данных по пользователям, совершившим платеж через мобильное приложение;
- просмотр данных по возвращаемости пользователей в мобильное приложение (совершение платежей за определенный период);
- просмотр данных по оттоку пользователей;
- формирование установленных отчетных форм.

### Средства разработки

Для выбора СУБД, используемой в новом решении требуется провести сравнительный анализ серверных архитектур используемых для современных БД.

Основным параметром классификации параллельной серверной архитектуры является наличие общей (SMP) или распределенной памяти (MPP). Нечто среднее между SMP и MPP представляют собой NUMA-архитектуры, где память физически распределена, но логически общедоступна.

Сравнительный анализ серверных архитектур представлен в таблице 1.

Таблица 1. Сравнительный анализ серверных архитектур

Архитектура	SMP	MPP	NUMA
Производительность	+	+	+/-
Масштабируемость	-	+	+/-
Скорость обработки запросов	+	+	+
Разделение данных	-	+	+/-

Использование MPP СУБД (Massively Parallel Processing, Массово-параллельная обработка) баз данных [4], для разработки аналитических систем имеет ряд преимуществ в сравнении с традиционными реляционными СУБД:

- масштабируемость и производительность: MPP СУБД позволяют обрабатывать огромные объемы данных, разбивая их на множество узлов, которые могут обрабатываться параллельно. Это обеспечивает высокую производительность аналитических запросов и масштабирование системы по мере увеличения объема данных;
- разделение данных: MPP СУБД разделяют данные на множество фрагментов, каждый из которых хранится на отдельном сервере. Это ускоряет аналитические запросы и улучшает производительность системы;
- гибкость: MPP СУБД подходят для разнообразных сценариев использования, включая обработку больших данных, аналитику в режиме реального времени, машинное обучение и многое другое.

Среди MPP СУБД одними из самых популярных являются:

- Amazon Redshift;
- Apache Hadoop;
- Greenplum;
- Teradata.

Сравнительный анализ СУБД представлен в таблице 2.

Таблица 2. Сравнительный анализ СУБД

СУБД	Amazon Redshift	Apache Hadoop	Greenplum	Teradata
Лицензия	-	+	+	-
Масштабируемость	-	+	+	-
Открытый исходный код	-	+	+	-
Разделение данных	+	+	+	+
Совместимость с операционными системами	-	-	+	-

Выбор СУБД для разработки целевого хранилища данных системы сделан в пользу Greenplum [5].

Для разработки информационно-аналитической системы коммунального биллинга выбор Greenplum обусловлен следующими причинами:

- открытость исходного кода. Greenplum - открытая СУБД, исходный код которой доступен для изучения и модификации. Это позволяет разработчикам контролировать свои данные и адаптировать систему под свои нужды;
- бесплатность. Greenplum в отличии от своих конкурентов предоставляется бесплатно для использования и распространения, что снижает затраты на разработку системы и делает ее более доступной для малого и среднего бизнеса.

Для описания архитектуры системы применяют различные нотации и модели:

- MS Visio;
- UML диаграммы;
- модель представления С4.

Сравнительный анализ нотаций и моделей, используемых для описания архитектуры системы представлен в таблице 4.

Таблица 4. Сравнительный анализ средств проектирования

Модель	MS Visio	UML	С4
Возможность декомпозиции	+	+	+
Сложность декомпозиции	-	-	+
Совместимость с операционными системами	+	+	+
Стоимость	-	+	+
Импорт/экспорт данных	+	+	+
Работа в режиме онлайн	-	+	+

В качестве способа описания архитектуры выбрана модель представления Модель С4 (от англ. С4 model, Context Container Component Code model, модель «контекст-контейнер-компонент-код») лишенная большинства перечисленных проблем [6]. Она объединяет 4 иерархических уровня и является простым методом графической записи для моделирования архитектуры программных систем.

Модель С4 основана на структурной декомпозиции системы на контейнеры и компоненты и опирается на существующие методы моделирования, такие как Unified Modeling Language (UML) или ER-модель (ERD), для более детальной декомпозиции архитектурных блоков. На основе пользовательских требований составляется первый уровень модели – диаграмма системного контекста. Данная диаграмма описывает функции, которые приносят пользу пользователям. Уровень включает в себя сам продукт, и взаимосвязанные с ним системы.



На рисунке 1 представлена диаграмма системного контекста (диаграмма первого уровня).

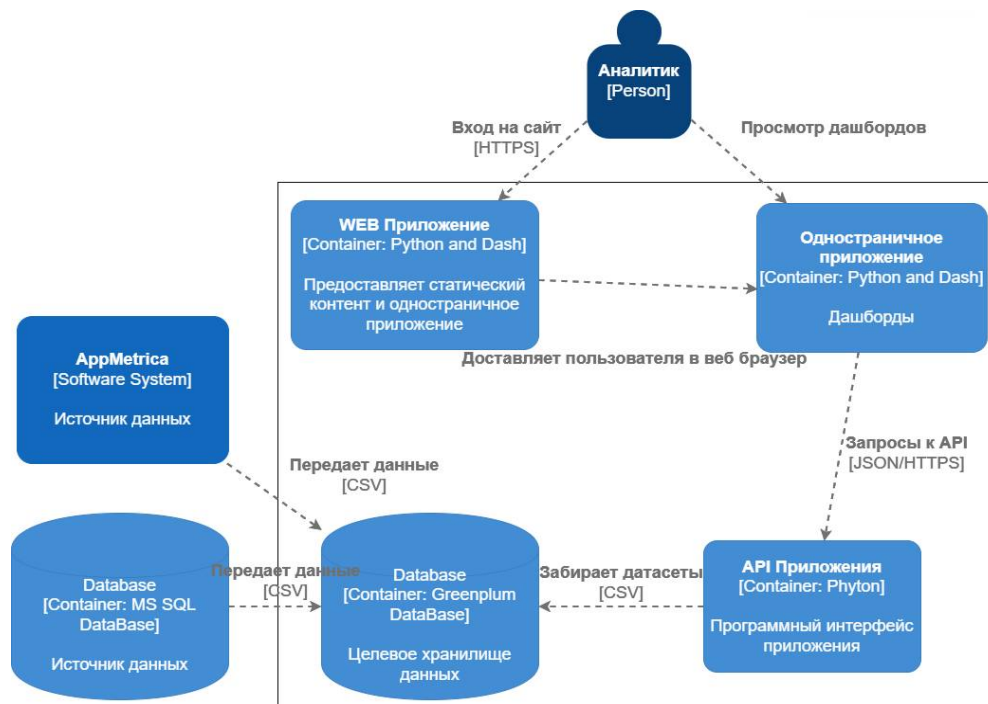


Рис. 1. Диаграмма системного контекста

Источниками данных для системы являются база данных на MS SQL и сформированные отчеты из AppMetrica. Целевое хранилище обрабатывает полученные из источников данные и формирует наборы данных. Веб-приложение через программный интерфейс получает подготовленные данные и загружает их в дашборды для отображения сформированных отчетов и проведения анализа данных аналитиком.

### Заключение

1. Проведен обзор процесса анализа данных.
2. Рассмотрена проблема анализа данных коммунального биллинга в мобильном приложении.
3. Рассмотрены существующие решения, используемые для анализа данных платежной системы «Абонент+», выявлены их недостатки, предложено новое решение.
4. Выбраны инструментальные средства для разработки. Обоснован их выбор, перечислены преимущества.

### Библиографический список

1. Струнин, Д. А. Бизнес-аналитика и большие данные / Д. А. Струнин. — Текст: непосредственный // Молодой ученый. — 2023. — № 32 (479). — С. 8-10. — URL: <https://moluch.ru/archive/479/105384/> (дата обращения: 22.02.2024).
2. Аналитика, инструменты и интеллектуальный анализ больших разномасштабных данных/ Р.А. Багутдинов, Н.А. Саргсян, М.А. Краснопахтыч — Текст: непосредственный // Санкт-Петербург: Экономика. Информатика, 2020. — Том 47, №4, С. 792-802. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analitika-instrumenty-i-intellektualnyy-analiz-bolshih-raznorodnyh-i-raznomasshtabnyh-dannyh/viewer> (дата обращения: 22.02.2024).
3. Мартенс А.А. Финансовая аналитика: проблемы и решения. // – Барнаул, 2016. – №14 С. 49–62
4. Kargassekov Y.M. Вестник магистратуры // – Йошкар-Ола, 2021. – №4-3(115) С. 30–31
5. Greenplum database [Электронный ресурс]. (URL): <https://greenplum.org/> (дата обращения 22.02.2024).
6. The C4 model for visualising software architecture // C4Model [Электронный ресурс]. (URL): <https://c4model.com/> (дата обращения 22.02.2024).

УДК 658.64; ГРНТИ 06.81.12

## **ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ ПРЕДПРИЯТИЯ ПО ДОСТАВКЕ ПРОДУКТОВ В ПОСЕЛЕНИИ СЕЛЬСКОГО ТИПА**

**И.Н. Дорин**

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань*

*Аннотация.* В работе рассматривается формулирование принципов организации предприятия по доставке продуктов в поселениях сельского типа, выявление ограничений и негативных аспектов торговли на селе. Осуществляется разработка механизмов для успешной организации такого рода предприятия.

*Ключевые слова:* организация предприятия, бизнес, конкурентная обстановка, анализ рынка.

## **PRINCIPLES OF ORGANIZING AN ENTERPRISE FOR DELIVERY OF PRODUCTS IN A RURAL-TYPE SETTLEMENT**

**I.N. Dorin**

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russian Federation, Ryazan*

*Annotation.* The paper discusses the formulation of principles for organizing an enterprise for the delivery of products in rural settlements, identifying the restrictions and negative aspects of trade in rural areas. Mechanisms are being developed for the successful organization of this type of enterprise.

*Key words:* enterprise organization, business, competitive environment, market analysis.

### **Цель работы**

Сельские поселения играют важную роль в жизни общества. Их жители вносят значительный вклад в развитие сельской экономики. Тем не менее, одной из ключевых проблем, с которой сталкиваются сельские жители, является ограниченный доступ к разнообразным продуктам и услугам.

Сельские районы, хотя и являются зонами с важной сельскохозяйственной деятельностью, часто характеризуются удаленностью от крупных городов. Это сказывается на обеспеченности ими продуктами и услугами. Местные магазины могут иметь ограниченный ассортимент, цены могут быть выше, а качество обслуживания оставлять желать лучшего.

Целью настоящей работы является формулирование принципов организации предприятия по доставке продуктов в поселениях сельского типа, выявление ограничений, негативных аспектов торговли на селе и механизмов успешной организации такого предприятия.

### **Потребительский спрос и негативные моменты организации предприятия в сельской местности**

Для успешной организации предприятия по доставке продуктов в сельских районах, необходимо проанализировать потребительский спрос. Одним из возможных вариантов этого анализа может послужить опрос среди местных жителей с целью выяснения, какие продукты наиболее востребованы, какие условия доставки ими одобряются, и какие дополнительные услуги могут быть востребованы. Эта информация может помочь адаптировать торговый бизнес к потребностям клиентов. Однако, стоит учитывать ограничения и негативные моменты, которые могут возникнуть в процессе решения задачи.

Можно выделить следующие ограничения и негативные моменты [1]:

- ограниченная клиентская база: сельские районы, как правило, имеют меньшее население, что приводит к ограничению клиентской базы. Это может оказать влияние на объем продаж и доходы;

- сложности в доставке продуктов: доставка продуктов в сельские районы может быть сложной из-за большого расстояния и состояния дорог, что может повысить расходы;

- ограниченный ассортимент продуктов: не все поставщики готовы поставлять свой товар в сельские районы. Это ограничивает ассортимент товаров, доступных для продажи;
- конкуренция с существующими магазинами: существующие магазины в сельских районах могут уже предоставлять услуги доставки.

Новое предприятие должно уметь конкурировать с другими за привлечение клиентов. Этот пункт является одним из наиболее важных не только для формирования предприятия по доставке продуктов в поселении сельского типа, но и бизнеса в целом [2]. Рассмотрим его более подробно.

### **Анализ конкурентной обстановки**

Анализ конкурентной обстановки позволяет определить, с кем и каким образом предприятие будет вести соперничество. Главными конкурентами могут быть уже существующие магазины, которые также предоставляют услуги доставки. Важно выявить их сильные и слабые стороны. Например, можно проанализировать, какие продукты они предлагают, какие цены и условия доставки у них есть, и каков уровень обслуживания клиентов.

Кроме того, не стоит забывать о возможных альтернативах для клиентов. Это могут быть местные ярмарки, фермерские рынки или другие источники продуктов. Следует рассмотреть, какие преимущества и недостатки у этих альтернатив, и как предприятие может предложить что-то уникальное.

Важно также провести анализ клиентов. Какие факторы повлияют на их решение воспользоваться именно вашими услугами? Какие преимущества они ищут, и что может удовлетворить их потребности лучше, чем у конкурентов?

Исходя из конкурентной обстановки, вы сможете разработать эффективную стратегию, которая поможет вашему предприятию успешно конкурировать и удовлетворять потребности клиентов в сельских районах, так как всё это является немаловажной частью анализа рынка.

### **Анализ рынка**

Анализ рынка играет ключевую роль в понимании потребностей и предпочтений клиентов в сельских районах. Сельские поселения могут иметь свои особенности, поэтому успешная организация доставки продуктов зависит от глубокого понимания рыночной среды [3].

Помимо вышеупомянутого определения спроса, анализ рынка также включает изучение предложения. Какие поставщики и производители продуктов готовы сотрудничать с вашим предприятием? Какие ассортименты они могут предложить? Необходимо оценить потенциал сотрудничества с местными фермерами и производителями.

Кроме того, важно учитывать особенности ценообразования на рынке сельских районов. Местные магазины могут иметь свои ценовые стратегии, поэтому необходимо определить, как сопоставить свои цены с ценами конкурентов, предоставляя при этом высокое качество услуг.

На основе всего вышесказанного, рассмотрим несколько наиболее благополучных сценариев для формирования такого рода бизнеса:

*Сценарий 1:* Село «Петрово» с населением 3000 человек, где нет службы доставки, но присутствует несколько магазинов.

*Стратегия:*

- партнерство с магазинами: установить сотрудничество с местными магазинами для формирования совместной доставки продуктов, где магазины будут предоставлять продукцию, а ваше предприятие заниматься его доставкой.

- платформа для формирования заказов: добавить возможность заказа продуктов по номеру телефона или (если позволяют ресурсы) разработать мобильное приложение или веб-платформу для более удобного формирования заказов.

- регулярно обновлять каталог товаров и предлагать сезонные спецпредложения, а также активно развивать онлайн-сообщество.

*Сценарий 2:* Село «Иваново» с численностью населения 4500 человек и двумя продуктовыми магазинами, один из которых предоставляет доставку только по номеру телефона и в ограниченное время.

*Стратегия:*

- расширение времени доставки: провести анализ времени, когда население села наиболее активно делает заказы. Расширить график доставки, сфокусировавшись на часах в пик активности клиентов.

- более совершенная, чем у конкурента, платформа для заказов: разработать мобильное приложение или веб-платформу для наиболее удобного формирования заказов. Можно рассмотреть возможность отслеживания статуса заказа в реальном времени.

- программа-лояльности: запустить программу лояльности с бонусами и скидками для постоянных клиентов. Например, скидка на следующий заказ при каждой третьей доставке.

На основе описания сценариев, село «Петрово» (первый сценарий) кажется наиболее подходящим для создания бизнеса по доставке продуктов, так как в нём отсутствует конкуренция. Однако по сравнению с селом «Иваново» (второй сценарий) здесь относительно небольшое население, что может выразиться в виде небольшой клиентской базы и ограничить масштаб бизнеса. Но при тщательной реализации маркетинговых мероприятий (реклама, сотрудничество с местными магазинами, программы лояльности) этот недостаток может компенсироваться.

### Внедрение информационных технологий

Для обоих рассмотренных сценариев существенным плюсом будет являться наличие информационной платформы, благодаря которой жители сельского поселения смогут наиболее комфортным образом осуществлять заказ себе на дом. В качестве примера можно рассмотреть возможный макет будущего web-приложения по доставке еды. Оно будет предоставлять весь ассортимент товаров, имеющихся в магазине или магазинах, с которыми заключено партнерство. Удобный интерфейс, внедрение поиска и разделение всего наличия товаров на подкатегории (например, хлеб и выпечка или мясо и рыба) позволит пользователям быстро ориентироваться в приложении, а программа лояльности должна набирать и удерживать наибольшее количество клиентской базы. Результат представлен на рисунке 1.

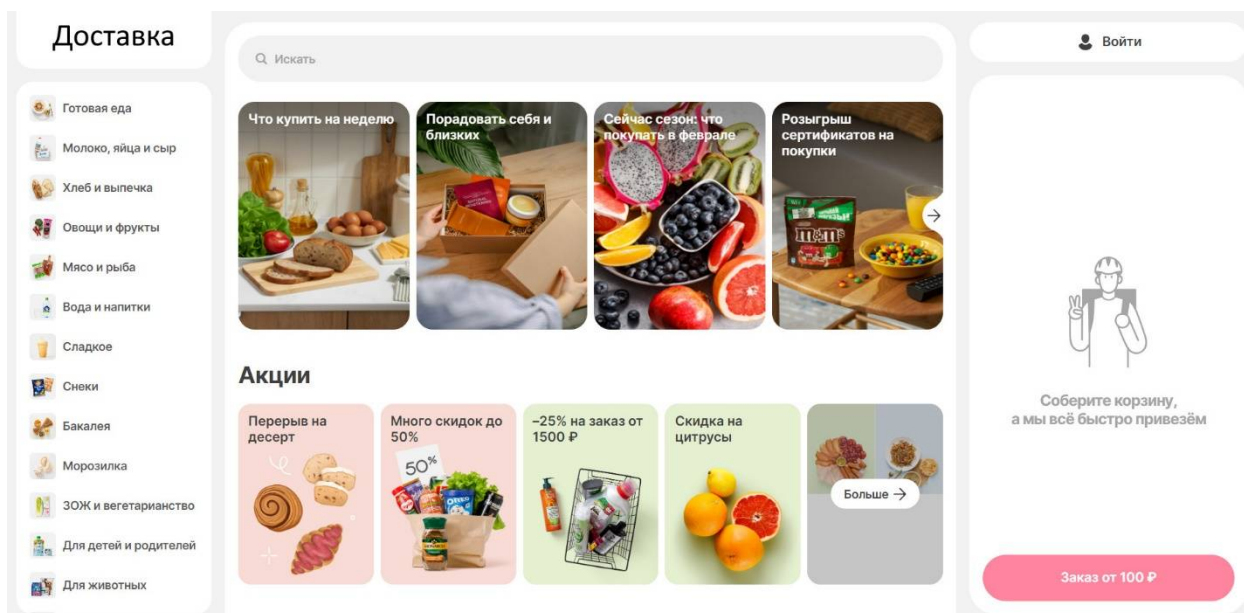


Рис. 1. Макет Web-приложения (главное меню)

Стоит отметить, что регистрация также не должна стать проблемой для новых пользователей приложения. Для простоты и удобства лучше всего может подойти номер телефона. Подробности представлены на рисунке 2.

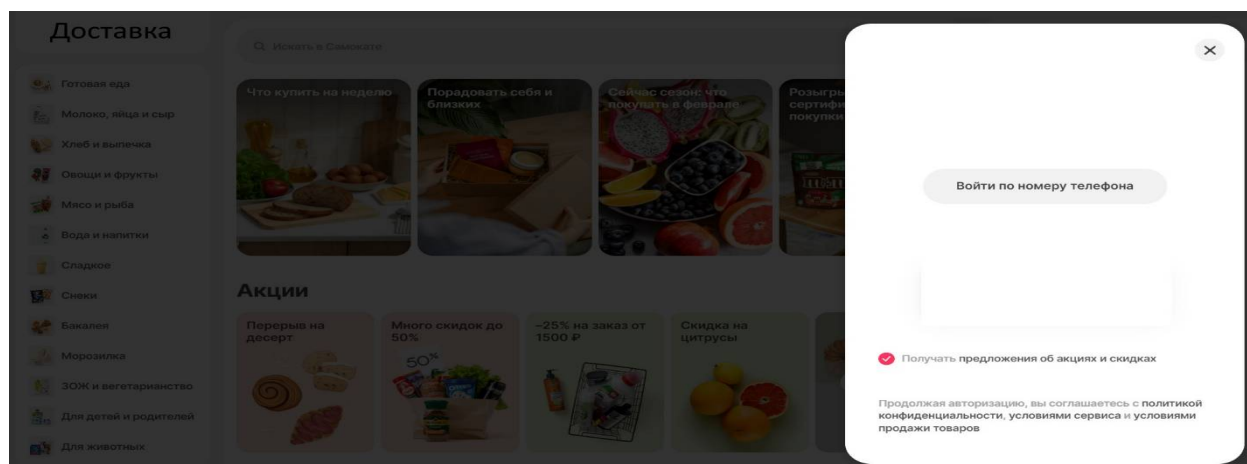


Рис. 2. Макет Web-приложения (регистрация по номеру телефона)

Модель функционирования системы по доставке продуктов в сельских районах

В качестве основного результата всего вышесказанного будет выступать модель, представляющая общее функционирование системы по доставке продуктов в поселениях сельского типа. Рассмотрим подробнее принцип её работы.

В самом начале клиент связывается с службой доставки посредством звонка или использования приложения (в том случае, если оно имеется). Затем, он выбирает необходимые ему продукты из предложенного ассортимента и оформляет заказ на доставку. Служба доставки, в свою очередь, получает заказ и подтверждает его клиенту, тем самым обеспечив уверенность в том, что запрос принят. После этого, в соответствии с заказом, на складе осуществляется сбор продуктов. Также создаются необходимые документы для учета и обеспечения юридической прозрачности. К ним можно отнести следующие:

- заказ клиента (электронный или бумажный документ, содержащий информацию о товарах, их количестве, стоимости, адресе доставки и возможные другие детали заказа);
- счет-фактура (документ, подтверждающий стоимость товаров и услуг, выставляемый клиенту);
- накладная (документ, который сопровождает груз в пути и содержит информацию о товарах, отправителе, получателе и месте доставки. Это важный документ для контроля грузоперевозок и учета товаров);
- квитанция (документ, подтверждающий факт доставки, включающий дату, время и место доставки. Клиент может подписать квитанцию или предоставить электронное подтверждение);
- отчет о состоянии товаров (документ, фиксирующий состояние товаров в момент доставки. Это может быть особенно важно для перевозки хрупких или скоропортящихся товаров).

Подготовленные товары и соответствующие документы передаются курьеру для последующей доставки. Кроме того, с целью уменьшения времени необходимо выбрать оптимальный маршрут. Затем клиент получает уведомление о том, что товары находятся в пути, а также ожидаемое время доставки. Курьер доставляет товары по определенному маршруту и вручает их заказчику, который должен подтвердить получение товаров (подписывая квитанцию или через приложение). Также предусмотрена обратная связь и оценка со стороны клиента о качестве продуктов и процессе доставки. В конечном итоге происходит формирование отчетности и актуализации продуктов на складе (обновление системы учета товаров на складе после успешной доставки). Результат представлен на рисунке 3.



Рис. 3. Модель общего функционирования системы по доставке продуктов в поселениях сельского типа

Данная система охватывает все ключевые этапы процесса доставки еды, начиная от получения заказа и заканчивая актуализацией продуктов на складе, что, конечно же, должно помочь в управлении и постоянном улучшении качества сервиса по доставке продуктов в сельских районах.

### Библиографический список

1. Проблемы малого предпринимательства в сельском хозяйстве [Электронный ресурс]. - <https://e-koncept.ru/> - Режим доступа: <https://e-koncept.ru/2017/770431.htm?ysclid=lt2rpgpb9586908577>, свободный (дата обращения: 18.02.2024).
2. Как организовать бизнес по доставке продуктов из магазина? [Электронный ресурс]. - <https://litebox.ru/> - Режим доступа: <https://litebox.ru/blog/for-business/kak-organizovat-biznes-po-dostavke-produktov-iz-magazina/?ysclid=lq67iq8zfk766794111>, свободный (дата обращения: 19.02.2024).
3. Бизнес-план доставки продуктов на дом [Электронный ресурс] <https://www.equipnet.ru/> - режим доступа: [https://www.equipnet.ru/org-biz/uslugi/uslugi\\_474.html?ysclid=lt2s95uktk634575674](https://www.equipnet.ru/org-biz/uslugi/uslugi_474.html?ysclid=lt2s95uktk634575674), свободный (дата обращения: 22.02.2024).

УДК 004.423.4; ГРНТИ 50.41.21

## АЛГОРИТМ ПОИСКА ЗАПРОСОВ, НЕСОВМЕСТИМЫХ С ЦЕЛЕВОЙ СУБД, ПРИ МИГРАЦИИ БАЗЫ ДАННЫХ

Д.И. Бубликов, А.В. Маркин

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, [d.i.bublikov@gmail.com](mailto:d.i.bublikov@gmail.com)

**Аннотация.** В статье рассматривается способ поддержки миграции базы данных, основанный на анализе SQL запросов. Описываются основы анализа языков программирования, синтаксический и семантический анализ. Создается алгоритм анализа SQL запросов, позволяющий обнаруживать в них функционал, специфичный для исходной СУБД. В предложенном алгоритме учитываются особенности языка SQL. Рассматривается пример применения предложенного алгоритма к запросу для СУБД Firebird с визуализацией синтаксических деревьев. По результатам применения предложенного алгоритма обнаруживаются и исправляются проблемы в исходном запросе, не позволяющие выполнить его в СУБД PostgreSQL.

**Ключевые слова:** базы данных, реляционные СУБД, SQL, анализ программ, Firebird, PostgreSQL, синтаксический и семантический анализ.



## ALGORITHM FOR SEARCHING QUERIES INCOMPATIBLE WITH THE TARGET DBMS DURING DATABASE MIGRATION

D.I. Bublikov, A.V. Markin

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, d.i.bublikov@gmail.com

*The summary.* The article discusses a way to support database migration based on the analysis of SQL queries. The basics of programming language analysis, syntactic and semantic analysis are described. An algorithm for analyzing SQL queries is created that allows detecting functionality specific to the initial DBMS in queries. The proposed algorithm takes into account the peculiarities of the SQL language. An example of applying the proposed algorithm to a query for the Firebird DBMS with visualization of syntax trees is considered. Based on the results of applying the proposed algorithm, problems in the original query that prevent its execution in the PostgreSQL DBMS are detected and corrected.

*Keywords:* databases, relational DBMS, SQL, program analysis, Firebird, PostgreSQL, syntactic and semantic analysis.

Для описания запросов в реляционных системах управления базами данных (СУБД) используется язык программирования SQL [1]. SQL является общепринятым языком запросов к реляционным СУБД, но каждая СУБД реализует его не полностью, по-другому и/или имеет функционал, не описанный в стандарте. Вследствие этого для решения одной и той же задачи на разных СУБД приходится писать разные запросы.

Иногда в информационных системах (ИС) появляется необходимость сменить СУБД. Причиной может быть недостаточная производительность текущей СУБД в связи с увеличением масштаба ИС; изменение условий использования, указанных в лицензии СУБД; повышение цены лицензии СУБД и т.д. Смена СУБД, также называемая миграцией базы данных (БД) – не простая задача. Функционал различных СУБД только частично пересекается, из-за чего периодически приходится использовать функционал, который есть только в некоторых СУБД. Поэтому одна из подзадач миграции – это переписывание запросов под целевую СУБД. Целевой СУБД называется та, которая заменит предыдущую по завершении смены СУБД. Она заведомо считается лучше предыдущей, потому что в противном случае смена СУБД несёт только вред. Предыдущая СУБД также называется исходной.

Благодаря стандартизации SQL многие запросы работают практически везде, но существуют запросы, которые работают только в некоторых СУБД. Поэтому одна из подзадач миграции БД – поиск в запросах функционала, который есть в исходной СУБД, но нет в целевой, и исправление этих запросов.

Специфичным для исходной СУБД называется тот функционал, который не реализован в целевой СУБД. Из этого определения следует, что определить, является ли функционал специфичным для целевой СУБД, возможно только зная, какая конкретная СУБД выбрана в качестве целевой.

Цель статьи – создание метода нахождения в SQL запросах функционала исходной СУБД, которого нет в целевой.

### Теоретическая часть

Под функционалом СУБД в SQL запросах подразумевается конструкция языка SQL в совокупности с её синтаксисом и семантикой или ссылка на предопределённый объект базы данных (БД).

Для примера сравним запрос к СУБД Firebird «SELECT 1 AS "X" FROM rdb\$database;» с запросом к PostgreSQL «SELECT 1 AS "X";». Оба запроса возвращают одну строку со столбцом «X», имеющим значение 1. Запросы отличаются синтаксически, т.к. Firebird не поддерживает запрос SELECT без секции FROM. Формально запросы также отличаются семантически. PostgreSQL запрос явно возвращает ровно одну строку, а Firebird

запрос возвращает столько строк, сколько их в таблице `rdb$database`, а таблица `rdb$database` всегда содержит ровно одну строку. Хотя формально запросы отличаются семантикой, эти детали не влияют на результат выполнения запросов, поэтому запросы считаются семантически эквивалентными. К функционалу СУБД также относятся ссылки на предопределённые объекты БД. В данном случае это ссылка на системную таблицу `rdb$database`, которая есть только в Firebird.

Синтаксис и семантика могут как отличаться, так и совпадать. На основе этого выведено, что возможно 4 случая:

- 1) одинаковый синтаксис и одинаковая семантика;
- 2) разный синтаксис и разная семантика;
- 3) разный синтаксис и одинаковая семантика;
- 4) одинаковый синтаксис и разная семантика.

В случае 1 в запросе ничего менять не нужно. Случаи 2 и 3 обнаружить нетрудно, поскольку они явно различаются по синтаксису. Главной проблемой является случай 4, когда запросы «выглядят» одинаково, но имеют разный смысл. Не выполняя запрос, обнаружить такое можно только зная конкретные конструкции языка SQL, где расходится только семантика. Поэтому случай 4 не учитывается как трудно анализируемый.

Для нахождения в запросе функционала, который есть в одной СУБД, но нет в другой, необходимо провести синтаксический и семантический анализ запроса. Такой подход используется для анализа языков программирования [2]. Синтаксический анализ позволяет обнаружить часть синтаксиса запросов для исходной СУБД, которую целевая СУБД не поддерживает, а семантический анализ позволяет обнаружить ссылки на предопределённые объекты БД, которых нет в целевой СУБД. При обнаружении таких проблем в запросе генерируется сообщение, указывающее, где и какая проблема находится

Для проведения синтаксического анализа необходимо разработать программу, соответственно называемую синтаксическим анализатором. На вход программы поступает текст, представляющий собой SQL запрос. По результату своей работы синтаксический анализатор генерирует структуру данных, описывающую отношение между частями языка. Обычно этой структурой данных представляется логическим деревом. Соответственно его называют синтаксическим деревом [2]. На рисунке 1 представлено синтаксическое дерево ранее рассмотренного запроса для Firebird.

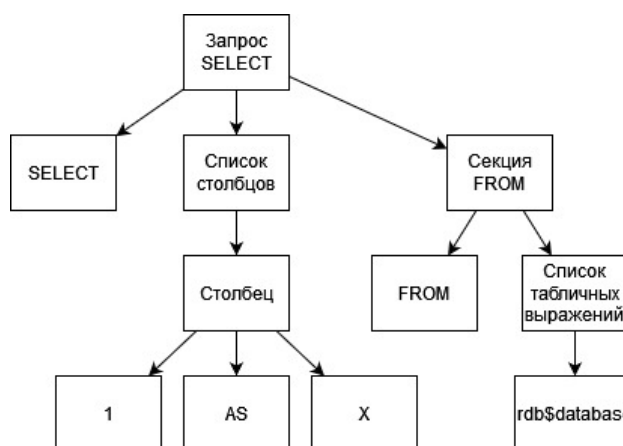


Рис. 1. Пример синтаксического дерева

После построения синтаксического дерева предлагается проводить дополнительный синтаксический анализ. Для каждой вершины проверяется, поддерживается ли её синтаксис в целевой СУБД, или нет. Если нет, то сообщается, что найдена часть синтаксиса SQL Firebird, не поддерживаемая целевой СУБД. При этом найденная вершина и её дочерние вершины ис-



ключаются из дальнейшего анализа и для текущего и для всех последующих этапов анализа. Если их оставить, они могут вызвать множество ложных сообщений на следующих этапах анализа.

Практически во всех СУБД существуют запросы для работы с хранимыми процедурами и триггерами. Такие запросы следует всегда считать поддерживаемыми только одной СУБД, поскольку эти запросы содержат процедурный SQL [1]. Процедурный SQL не описан в стандарте SQL, и его реализация у каждой СУБД значительно отличается.

За синтаксическим анализом следует семантический анализ. Предлагается следующий алгоритм анализа. Он проводится путём обхода синтаксического дерева. Перед началом семантического анализа создаётся таблица идентификаторов, определяющая для каждого идентификатора, на что он ссылается: на столбец, на таблицу или на процедуру и т.д. Исходная таблица заполняется идентификаторами предопределённых и пользовательских объектов БД. Во время анализа запроса в таблицу также добавляются идентификаторы, объявленные в самом запросе. Когда в синтаксическом дереве находится идентификатор, он ищется в таблице. По результатам поиска идентификатора может произойти следующее.

1. Идентификатор найден, и он ссылается на предопределённый объект БД. В таком случае генерируется сообщение о найденном функционале, специфичном для Firebird.

2. Идентификатор найден, и он ссылается на пользовательский объект БД. Сообщение не генерируется, поскольку объект пользовательский и его можно создать и в целевой СУБД.

3. Найден идентификатор, объявленный в запросе. Такой идентификатор существует только в рамках текущего запроса. Поэтому для них также не генерируется сообщение.

4. Идентификатор не найден. Это ошибка, и из неё следует, что в таблице не хватает идентификатора предопределённого или пользовательского объекта БД.

Следует также отметить, что в Firebird большинство SQL функций определено в синтаксисе самого языка, а не как предопределённые объекты БД. Такие функции будут обнаружены на этапе синтаксического анализа, а не семантического [3].

### Практическая часть

Рассмотрим применение разработанного метода на примере запроса к Firebird (листинг 1).

Листинг 1 – Пример анализируемого запроса.

```
SELECT FIRST 5
  p.accountcd, SUM(p.paysum) * IIF(POSITION('0', p.accountcd) = 1, 0.5, 1)
FROM paysumma AS p
GROUP BY p.accountcd;
```

Первый шаг анализа запроса – построение его синтаксического дерева. На следующем шаге проводятся дополнительный синтаксический и семантический анализ. Эти этапы анализа независимые, поэтому их можно проводить как параллельно так последовательно. Но в случае параллельного анализа, достаточно обойти синтаксическое дерево единожды, а в случае последовательного анализа синтаксическое дерево придётся обходить дважды. Поэтому далее производится параллельный анализ.

Перед началом семантического анализа запроса создаётся таблица идентификаторов. В неё добавляются все предопределённые и пользовательские объекты БД. Пусть в БД существует пользовательская таблица `paysumma`, имеющая столбцы `paysum` и `accountcd`. Таблица `paysumma` и её столбцы добавляются в таблицу идентификаторов.

Начало синтаксического дерева представлено на рисунке 2. Секции обрабатываются в таком порядке, в каком выполняется запрос. Поэтому в первую очередь обрабатывается секция `FROM`. Её синтаксическое дерево представлено на рисунке 3.

Расхождения в синтаксисе отсутствуют. Обнаруживается ссылка на таблицу `rausumma`. Т.к. `rausumma` присутствует в таблице идентификаторов, никакого сообщения не генерируется. Обнаруживается объявленный псевдоним таблицы `rausumma – r`, он добавляется в таблицу идентификаторов.

Следует также отметить, что в синтаксическом дереве таблица `rausumma` называется селективной процедурой. Это связано с тем, что в синтаксисе запросов Firebird невозможно отличить ссылку на таблицу от вызова селективной процедуры без параметров.

Далее анализируется секция `GROUP BY`, её синтаксическое дерево представлено на рисунке 4.

Расхождений в синтаксисе отсутствуют. Обнаруживается ссылка на таблицу `r`. В таблице идентификаторов присутствует псевдоним `r`, поэтому сообщение не генерируется. Обнаруживается столбец таблицы `r`. Поскольку `r – псевдоним таблицы rausumma`, проверяется существование столбца `accountcd` в таблице `rausumma`. Он существует, поэтому сообщение не генерируется.

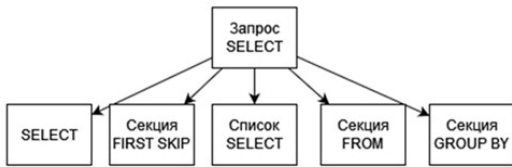


Рис. 2. Начало синтаксического дерева



Рис. 3. Синтаксическое дерево секции FROM



Рис. 4. Синтаксическое дерево секции GROUP BY

Далее проверяется секция `FIRST SKIP`. Сама секция отсутствует в синтаксисе запросов PostgreSQL. Поэтому генерируется сообщение о неподдерживаемом синтаксисе. Дочерние элементы секции `FIRST SKIP` не проверяются. Её синтаксическое дерево представлено на рисунке 5.

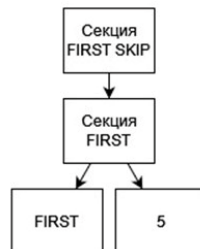


Рис. 5. Синтаксическое дерево секции FIRST SKIP

Вместо секции `FIRST SKIP` можно использовать секцию `OFFSET FETCH`. Тогда «FIRST 5» заменяется на «FETCH FIRST 5 ROWS ONLY». Причём секция `OFFSET FETCH` указывается после секции `GROUP BY`.

Далее проверяется список SELECT, который задаётся возвращаемые столбцы. Синтаксическое дерево первого столбца представлено на рисунке 6.

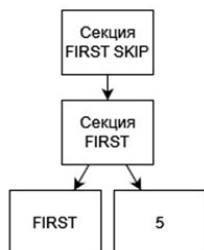


Рис. 5. Синтаксическое дерево секции FIRST SKIP



Рис. 6. Синтаксическое дерево первого столбца

Расхождений в синтаксисе нет. Проводятся те же проверки идентификаторов, какие были проведены для секции GROUP BY.

Синтаксическое дерево второго столбца представлено на рисунке 7.

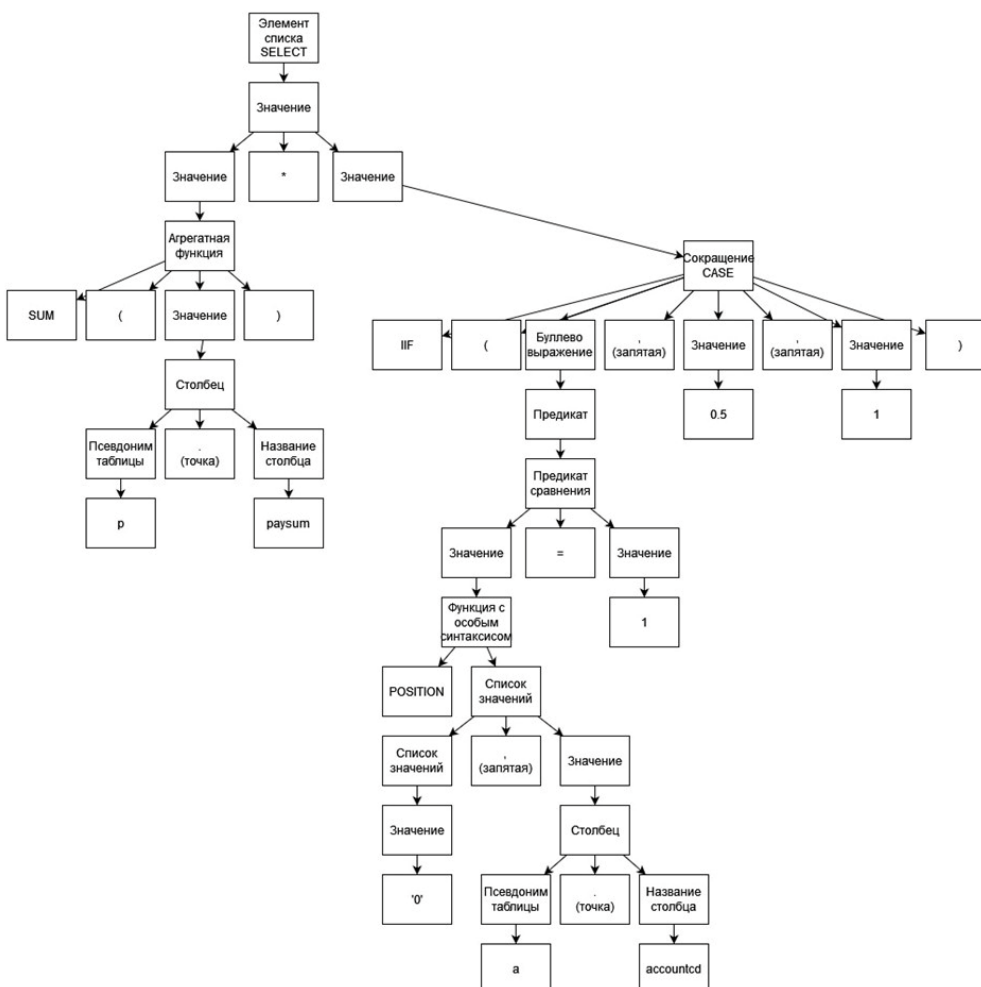


Рис. 7. Синтаксическое дерево второго столбца

В корне этого дерева находится оператор умножения. Сначала анализируется синтаксическое дерево левого операнда. Различия в синтаксисе отсутствуют. Следует отметить, что агрегатная функция SUM определена в самом синтаксисе SQL. Поэтому её поиск в таблице идентификаторов не производится. Обнаруживается столбец pausum. Благодаря псевдониму р узнаётся, что столбец pausum должен принадлежать таблице pausumma. Существование столбца pausum в таблице pausumma проверяется. Поскольку столбец существует, сообщение не генерируется.

Далее анализируется синтаксическое дерево правого операнда оператора умножения. Находится ключевое слово IIF. Оно не поддерживается синтаксисом PostgreSQL, поэтому генерируется сообщение о неподдерживаемом синтаксисе.

Поскольку ключевое слово IIF вызвало сообщение об ошибке, элементы, находящиеся на том же уровне иерархии и ниже, не проверяются. На этом анализ останавливается.

Чтобы продолжить анализ, и необходимо сначала исправить обнаруженные ошибки. Предположим, что выражение с функцией IIF заменяется эквивалентным выражением с CASE. Т.е. выражение «IIF(POSITION('0', p.accountcd) = 1, 0.5, 1)» заменяется на «CASE WHEN POSITION('0', p.accountcd) = 1 THEN 0.5 ELSE 1 END». После замены IIF на CASE, анализ продолжается. Обнаруживается вызов функции POSITION. После обнаружения запятой, разделяющей аргументы функции POSITION, генерируется сообщение о неподдерживаемом синтаксисе.

PostgreSQL поддерживает функцию POSITION, но с другим синтаксисом. Вместо запятой, разделяющей аргументы, должно быть ключевое слово «IN». Чтобы исправить ошибку выражение «POSITION('0', p.accountcd)» заменяется на «POSITION('0' IN p.accountcd)».

Итоговый исправленный запрос представлен в листинге 2.

Листинг 2 – Исправленный запрос.

```
SELECT
    p.accountcd, SUM(p.pausum) * CASE WHEN POSITION('0' IN p.accountcd) = 1 THEN
0.5 ELSE 1 END
FROM pausumma AS p
GROUP BY p.accountcd
FETCH FIRST 5 ROWS ONLY;
```

В итоге для создания исправленного запроса в исходный запрос были внесены следующие изменения:

- 1) конструкция «FIRST 5» заменена на конструкцию «FETCH FIRST 5 ROWS ONLY»;
- 2) функция IIF заменена на конструкцию CASE;
- 3) в списке аргументов функции POSITION запятая заменена на ключевое слово «IN».

Итоговый запрос возвращает тот же результат, что исходный, но теперь запрос выполняется в PostgreSQL.

## Вывод

Созданный алгоритм анализа запросов SQL позволяет обнаруживать в SQL запросах функционал, специфичный для СУБД Firebird. В качестве примера был рассмотрен анализ запроса для Firebird. После исправлений ошибок, найденных в процессе анализа запроса, получен запрос для СУБД PostgreSQL, по функциональному признаку аналогичный исходному. Разработанный метод продемонстрировал свою эффективность.

## Библиографический список

1. Маркин, А. В. Программирование на SQL : учебник и практикум для вузов / А. В. Маркин. — 3-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2024. — 805 с.
2. Robert Nystrom, Crafting Interpreters / Robert Nystrom, 2021. — 639 с.
3. Firebird Contributors. Dynamic SQL parser [Электронный ресурс].  
URL: <https://github.com/FirebirdSQL/firebird/blob/master/src/dsql/parse.y> (дата обращения: 03.03.2024).

УДК 004.057.6

## ОСОБЕННОСТИ КОНВЕРТАЦИИ ДАННЫХ В ПРОДУКТАХ 1С

В.К. Михайлик

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, what\_is\_lovem29@mail.ru

*Аннотация.* В статье рассматривается механизм конвертации данных в продуктах 1С. Описываются особенности и потенциальные проблемы конвертации, а также рассматривается путь для их решения.

*Ключевые слова:* Персональный компьютер (ПК), 1С предприятие, конвертация, типовая конфигурация.

## FEATURES OF DATA CONVERSION IN 1C PRODUCTS

V.K. Mikhaylik

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, what\_is\_lovem29@mail.ru

*The summary.* The article discusses the mechanism of data conversion in 1C products. The features and potential problems of conversion are described, and a way to solve them is considered.

*Keywords:* Personal computer (PC), 1C enterprise, conversion, standard configuration.

### Введение

Ключевым фактором успешного развития предприятий в современном информационном обществе является эффективное управление и анализ данных. Одной из популярных и востребованных систем автоматизации бизнес-процессов является отечественная программа 1С, которая позволяет автоматизировать бухгалтерский и управленческий учет, а также осуществлять обработку и анализ данных.

При переходе от одной версии программы к другой, внедрении новых функциональных возможностей или объединении учетных баз, приобретает значимость конвертация данных в продуктах 1С и её специфика.

Цель статьи состоит в проведении анализа особенностей процесса конвертации данных в продуктах 1С, выявлении потенциальных проблемных моментов и исследовании способа их решения с целью достижения эффективности и безошибочности данного процесса.

### Основная часть

Конвертация данных представляет собой процесс преобразования информации из одного формата в другой с сохранением целостности и структуры данных.

В продуктах 1С можно работать с данными в следующих форматах - текстовые файлы, таблицы Excel, XML, JSON и другие. Каждый формат имеет отличительные особенности, что вызывает необходимость использования особых подходов к конвертации. Конвертация данных не ограничивается простым переводом из одного формата в другой. В некоторых случаях требуется проводить трансформацию данных, например, изменять их структуру или применять определенные правила обработки [1].

Конвертация данных часто проводится в процессе обмена информацией между разными системами. 1С обеспечивает возможность работы с внешними системами, а также поддержку различных стандартов конвертации данных. Например, в 1С:Предприятие есть возможность работать с форматами данных EDI (Electronic Data Interchange), которые широко используются в электронной коммерции.

Для работы с конвертацией данных 1С предлагает встроенные инструменты. Например, в 1С:Предприятие имеется механизм под названием "Обмен данными с внешними источниками", который позволяет автоматизировать процесс конвертации данных.

Однако возникают случаи, когда необходимо конвертировать данные из нестандартных форматов, которые не поддерживаются встроенными средствами 1С. В таких случаях разработчикам приходится создавать специализированные механизмы конвертации, используя программирование на языке 1С.

Когда объем данных становится слишком большим, конвертация «вручную» становится трудозатратной задачей. В таких случаях необходимо автоматизировать процесс конвертации, например, с использованием пакетной обработки данных.

Основные проблемы, с которыми сталкиваются при конвертации данных в продуктах 1С:

1. Сложность конвертации данных из разных форматов в формат продуктов 1С. Это связано с различиями в структуре данных и способах их хранения в разных системах.

2. Несовместимость данных из разных версий продуктов 1С. Как известно, компания 1С периодически выпускает новые версии своих продуктов, в которых происходят изменения в структуре данных. При конвертации данных из одной версии в другую могут возникать проблемы совместимости.

3. Проблемы, связанные с потерей данных при конвертации. При конвертации данных могут возникать ситуации, когда часть данных не может быть корректно переведена из одного формата в другой.

Для решения, указанных выше проблем используются типовые конфигурации для работы с конвертацией.

Одной из таких в 1С является типовая конфигурация для работы с конвертацией – «Конвертация данных, редакция 3.0» (далее КДЗ.0), которая является удобным инструментом для разработки обменов, предполагающих наличие посредника передачи данных между конфигурациями в виде универсального формата данных EnterpriseData. В этом качестве КДЗ.0 является одним из компонентов технологии обмена данными через формат EnterpriseData.

Главной особенностью КДЗ.0 является концепция конвертации данных (см. рисунок 1):

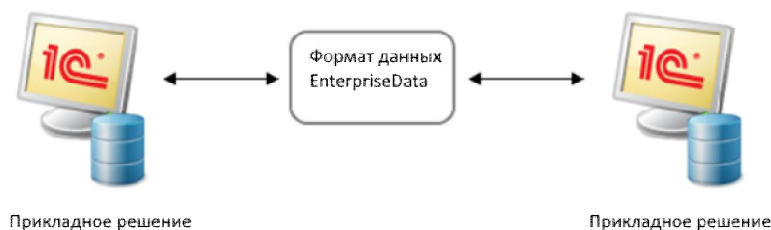


Рис. 1. Технология обмена через формат EnterpriseData

### Модель процесса конвертации

В основе, реализованной в библиотеке стандартных подсистем, механики конвертации данных через формат данных EnterpriseData, лежит модель, включающая в себя следующие элементы (далее - функциональные компоненты конвертации) [2]:

- конвертация,
- правила обработки данных,
- правила конвертации объектов, частью которых являются правила конвертации свойств,
- правила конвертации predetermined данных,
- алгоритмы.

В совокупности все эти компоненты реализуют функциональность, связанную с обработкой данных в процессе их получения, либо отправки:

1. Выполнение алгоритма конвертации «Перед конвертацией».
2. Заполняются параметры конвертации.
3. Выполняются различные подготовительные действия.
4. Проверка на выполнение правил обработки данных.

В том случае, если правила не выполнены, происходит выполнение очередного правила обработки данных:

1. Формирование выборки данных и сценария дальнейшей обработки данных в правилах конвертации объектов. (Алгоритмы правил обработки данных «При обработке» и «Выборка данных»).

2. Далее происходит проверка на выполнение правил конвертации объектов. В случае невыполнения делается очередное выполнение:

3. Конвертация данных информационной базы в данные в формате EnterpriseData. В процессе конвертации используются правила конвертации свойств, правила конвертации предопределенных данных и алгоритмы.

4. При успешной проверке на выполнение правил конвертации объектов, происходит возврат к проверке выполнения правил обработки данных.

5. После проверки на выполнение правил обработки данных выполняется алгоритм конвертации «Перед отложенным заполнением». Данный алгоритм позволяет подготовить данные перед выполнением алгоритмов «После загрузки всех данных».

6. Выполнение алгоритмов правил обработки данных «После загрузки всех данных».

7. Отложенная обработка загруженных объектов. Алгоритм предусмотрен для обработки данных, для выполнения которой может потребоваться окончание выполнения загрузки всех данных.

8. Отложенное проведение загруженных документов.

9. Отложенная запись загруженных объектов.

10. Выполнение алгоритма конвертации «После конвертации». (завершающие действия)

Процесс разработки конвертации в КДЗ.0 осуществляется по принципу компоновки элементов конвертации. Для упрощения параллельной разработки нескольких обменов данными в КДЗ.0 предусмотрена возможность использования общих элементов конвертации: правил обработки данных, правил конвертации объектов, правил конвертации предопределенных данных, алгоритмов.

Состав конвертаций определяется набором элементов справочника Элементы конвертации, устанавливающими связи между конвертациями и множеством функциональных компонентов конвертации.

В КДЗ.0 также поддерживается операция копирования состава конвертаций. При копировании состава конвертации не происходит создание новых правил - вместо этого существующие правила конвертации-источника включаются в состав указанной конвертации [2].

Результатом работы КДЗ.0 является код модуля менеджера обмена, состоящий из процедур и функций, в которых реализована логика загрузки данных, представленных в формате EnterpriseData, а также логика выгрузки данных в формат. Алгоритмы конвертации содержат код, выполняемый в одной конфигурации - той, для которой разрабатывается модуль конвертации. Алгоритмы конвертации не несут в себе информации о внутреннем устройстве конфигурации-корреспондента, вместо этого они ориентированы на структуру формата EnterpriseData (для простоты разработки в КДЗ.0 объекты формата EnterpriseData представлены аналогично объектам метаданных 1С:Предприятие).

## Заключение

Конвертация данных в продуктах 1С является сложным и ответственным процессом. Необходимо учитывать особенности конкретной системы, вид базы данных и требования к точности и корректности данных. Существует ряд проблем, возникающих при преобразовании данных, для которых был рассмотрен способ решения, а именно - использование типовой конфигурации «Конвертация данных, редакция 3.0», которая позволяет сделать этот процесс конвертации более эффективным и удобным для пользователя.

## Библиографический список

1. Бояркин В.Э., Филатов А. И. 1С.Предприятие 8. Конвертация данных. Обмен данными между прикладными решениями. 1С, 2008.
2. <https://its.1c.ru/db/metod8dev/content/5846/hdoc>

УДК 004.021

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТРИЗ В РЕШЕНИИ ИЗОБРЕТАТЕЛЬСКИХ ЗАДАЧ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ХАРАКТЕРА

**А.В. Кочетков**

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, zanaheo@bk.ru*

*Аннотация.* В обзорной работе дана краткая характеристика ТРИЗ, рассматриваются особенности применения теории решения изобретательских задач в сфере информационных систем и технологий.

*Ключевые слова:* ТРИЗ, теория решения изобретательских задач, информационные системы, информационные технологии.

## FEATURES OF TRIZ APPLICATION IN SOLVING INVENTIVE TASKS INFORMATION TECHNOLOGY

**A.V. Kochetkov**

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, zanaheo@bk.ru*

*The summary.* In the review paper, a brief description of TRIZ is given, the features of the application of the theory of solving inventive tasks in the field of information technology and systems are considered.

*Keywords:* TRIZ, theory of inventive problem solving, information systems and technology.

Одной из основных методологий решения изобретательских задач является ТРИЗ (теория решения изобретательских задач). Она позволяет путем выполнения конкретных инструкций и рекомендаций, являющихся универсальными подсказками или навигаторами для мышления человека, находить рациональные идеи в условиях широкого спектра возможных подходов к преодолению противоречий, лежащих в истоках проблемы. Таким образом, не только подтверждаются очевидные и понятные пути решения задачи, что нивелирует необходимость их предварительной проверки, но и открываются новые возможности; одновременно с этим исключаются неэффективные и трудоемкие концепции, спадает следующая за анализом задачи неопределенность в выборе тактики достижения идеального конечного результата.

В то же самое время, поскольку теория решения изобретательских задач ориентирована в большей степени на поиск решений проблем технического плана, возможность приложения её методологического инструментария к решению задач информационно-технологического характера является предметом дискуссий и изучена недостаточно. Совокупный практический опыт экспериментальных попыток внедрения показывает, что перспективы использования ТРИЗ в данной области многообещающи.

В публикациях описано применение теории решения изобретательских задач на всех этапах жизненного цикла программного обеспечения: от формирования идеи до эксплуатации и сопровождения. Также приведены эмпирические данные, позволяющие сделать вывод о высокой эффективности ТРИЗ на стратегическом уровне принятия решений, менеджмента, маркетинга и в сфере управления ИТ-проектами в целом [1].

Вместе с тем, многократно подчеркивается существование определенных трудностей использования теории решения изобретательских задач применительно к разработке информационных систем и технологий. ТРИЗ не предусматривает возможности прототипирования, не учитывает необходимость анализа больших объемов данных и быстрое развитие языков и средств программирования, а также имеет высокий уровень абстракции, что усложняет её взаимодействие с современными шаблонами проектирования и методологиями программирования, препятствует прогнозированию и ограничивает степень внедрения в процесс создания программного и аппаратного обеспечения.



На первый взгляд, применение ТРИЗ-методологии для решения изобретательских задач информационно-технологического характера выглядит проблематичным, однако, с учетом гибкости разработанного Г.С. Альтшуллером инструментария, а также принимая во внимание специфичные для предметной области особенности, подобная задача представляется не только решаемой, но и перспективной, что подтверждается накопившимся опытом решения задач при помощи ТРИЗ в транснациональных технологических корпорациях [2].

Вышеперечисленные проблемы успешно преодолеваются, если принимать во внимание соответствующие информационным технологиям отличительные свойства. Именно выявление, формулирование и рассмотрение особенностей, влияющих на функционирование приемов теории решения изобретательских задач в пределах этой среды, является целью данной статьи.

### Особенности применения ТРИЗ в ИТ-системах

Для того чтобы перейти к рассмотрению особенностей применения ТРИЗ в ИТ-системах необходимо указать, какой из многочисленных версий алгоритмов решения изобретательских задач (АРИЗ) будет взят за основу. В данной работе используется предложенный М.А. Орловым в работе [3] Мета-АРИЗ, обобщенная схема которого представлена на рисунке 1.

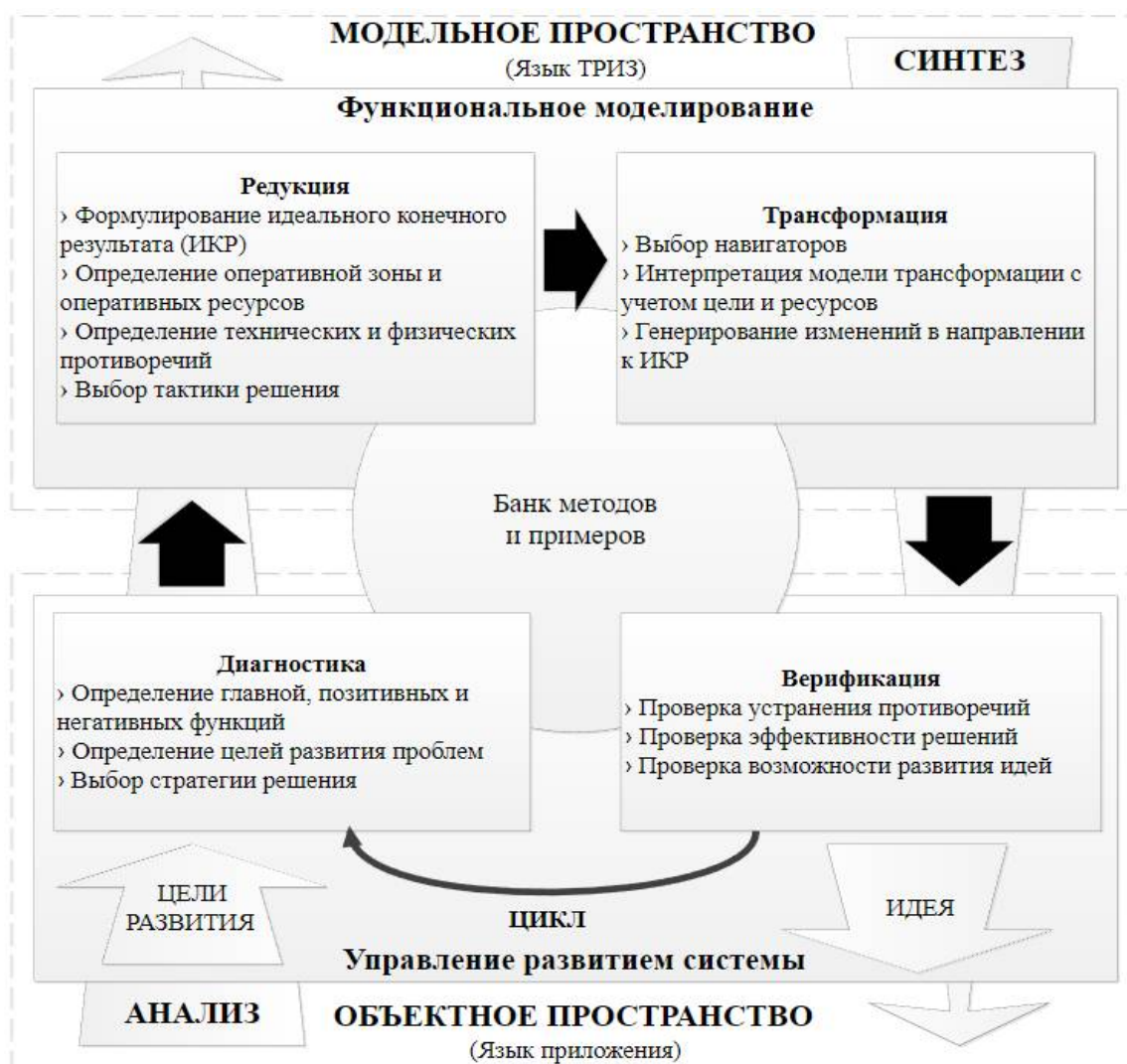


Рис. 1. Обобщенная схема Мета-АРИЗ

Мета-алгоритм изобретения получен как обобщение и упрощение описаний всех поколений АРИЗ и является основной навигационной системой при решении любой изобретательской проблемы. Получение желаемого результата в ТРИЗ является следствием разрешения противоречия либо во времени, либо в пространстве, либо в отношениях, либо в другой системе.

Использование подобного уникального набора универсальных методов приводит к тому, что на всех стадиях выполнения АРИЗ проявляются особенности ИТ-систем, которые необходимо учитывать при применении ТРИЗ [4]. Их можно сформулировать следующим образом:

1. Множество информационных сущностей.

Под сущностью понимается единица данных или однозначно идентифицируемый абстрактный или конкретный объект с набором описывающих его атрибутов. С учетом того, что количество таких объектов в информационных системах ничем не ограничено, достижение идеального конечного результата может быть значительно затруднено ввиду возможной разнородности наблюдающейся в системе структуры сущностей, которую необходимо учитывать при выборе стратегии и тактики решения конкретной задачи.

2. Связь между элементами не материальная, а информационная.

Большое количество компонентов информационной системы связано друг с другом различными отношениями и взаимосвязями, отследить каждую из которых сложно. Таким образом, воздействие на один элемент может привести к изменениям зависимых элементов или полностью нарушить работоспособность системы в целом. Ярким примером подобного выступает проблема сохранения ссылочной целостности в реляционных базах данных.

3. Элемент при воздействии на него может не изменяться.

Возможна ситуация, в которой у элемента после воздействия на него изменится наименование, хранимое значение или иные характеризующие его свойства, однако при этом в логической структуре системы и взаимоотношениях он продолжит выполнять изначально возложенную на него функцию. Пример – переменные.

4. Информационный поток имеет материальный носитель, который может не перемещаться в пространстве.

Информация не может перемещаться в пространстве и между объектами информационной системы сама по себе (исключая перемещение внутри одного объекта). Всегда существует аппаратный носитель, который, в свою очередь, может реализовывать разнообразные технологии передачи данных; быть как стационарным, так и переносным.

5. Хранение информации может быть реализовано динамично.

В подавляющем большинстве информационных систем предусмотрен механизм резервного копирования информации, что позволяет распределять данные по набору взаимозаменяемых БД или, в случае критических сбоев, позволяет быстро динамически восстановить поврежденные сведения.

6. Формирование информационного образа при помощи воздействия на него элементом.

В некоторых узкоспециализированных информационных системах происходит активное преобразование аналоговой информации с датчиков в цифровую. В результате в системе создается информация, отражающая состояние или значения параметров контролируемого материального объекта.

7. Управление материальным объектом на основе информации.

В некоторых узкоспециализированных информационных системах происходит активное преобразование цифровой информации в аналоговую с целью управления материальными объектами на основе получаемой ими информации.

Вышеуказанные особенности должны учитываться на всех этапах выполнения Мета-АРИЗ при:

- определении целей развития системы;
- выборе стратегии и тактики решения задачи;
- определении главной, позитивной и негативной функций;
- формулировании идеального конечного результата;
- определении оперативных ресурсов;
- определении технических, физических и информационных противоречий;
- выборе и интерпретации навигаторов;
- генерации идей, приближающих решение к идеальному конечному результату;
- проверка устранения противоречия и эффективности решения.

### **Заключение**

В статье на основе анализа публикаций сформулированы и рассмотрены в рамках информационных технологий особенности применения теории решения задач, показана важность принятия их во внимание на всех шагах выполнения Мета-АРИЗ.

Нетрудно заметить, что все выявленные особенности применения ТРИЗ в предметной области информационных технологий так или иначе тесно связаны с обработкой данных.

Таким образом, можно выделить несколько закономерностей и направлений развития:

- с увеличением объема информации процесс использования АРИЗ будет усложняться в соответствии с размерами данных;
- решение задач будет приводить к появлению новых противоречий, разрешение которых может потребовать генерации нестандартных идей с привлечением ресурсов из других систем;
- существующий банк решений, методов и примеров, использующийся на всех стадиях АРИЗ, будет точно спроецирован на предметную область информационных технологий и дополнен новыми примерами с поправкой на вышеприведенные особенности;
- навигаторы мышления и матрица Альтшуллера будут доработаны с поправкой на предметную область или реализованы в виде отдельного программного обеспечения.

### **Библиографический список**

1. Соколов, Н.Н. Применение технологии ТРИЗ при принятии управленческих решений в стратегическом управлении. – Москва: Вестник ГГУ, 2014. – с. 214-217. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-tehnologii-triz-pri-prinyatii-upravlencheskih-resheniy-v-strategicheskom-upravlenii/viewer> (дата обращения 24.12.2023).
2. Рубин, М.С. Семь мыслей о ТРИЗ в программировании и в IT. – ТРИЗфест, 2012. – с. 2. – URL: <https://temm.ru/ru/section.php?docId=4594> (дата обращения 24.12.2023).
3. Орлов, М.А. Основы классической ТРИЗ. Практическое руководство для изобретательного мышления. – 2-е изд., испр. и доп. – М:СОЛОН-ПРЕСС, 2006. – с. 432.
4. Кассу, Р., Рубин, М.С. Развитие подходов и методов ТРИЗ в IT-системах. – ТРИЗ в развитии, 2023. – с. 120-126. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-podhodov-i-metodov-triz-v-it-sistemah/viewer> (дата обращения 24.12.2023).

УДК 004.94; ГРНТИ 50.41.25

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕЧЕТКИХ КОГНИТИВНЫХ КАРТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭВОЛЮЦИОННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

С.А. Азаренко, Р.А. Исаев

*Брянский Государственный Технический Университет,  
Российская Федерация, Брянск, s\_azarenko@outlook.com*

*Аннотация.* Статья посвящена развитию математического аппарата когнитивного моделирования. Рассмотрена задача идентификации нечеткой когнитивной карты и методы, применяемые в настоящее время для ее решения. Указан ряд проблем известных методов идентификации, чем обоснована актуальность разработки нового метода. Описаны основные идеи предлагаемого метода идентификации, призванного решить выявленные проблемы и основанного на представлении знаний о моделируемой системе в виде набора формализованных правил и на использовании генетического алгоритма для подбора оптимальных структуры и параметров нечеткой когнитивной карты. Рассмотрен пример использования некоторых идей, положенных в основу метода, а также указаны основные направления разработки и развития метода.

*Ключевые слова:* когнитивное моделирование, нечеткая когнитивная карта, идентификация когнитивной модели, эволюционные вычисления, генетические алгоритмы.

## IDENTIFICATION OF FUZZY COGNITIVE MAPS USING EVOLUTIONARY COMPUTATION

S.A. Azarenko, R.A. Isaev

*Bryansk State Technical University,  
Russian Federation, Bryansk, s\_azarenko@outlook.com*

*Abstract.* The article is devoted to the improvement of the mathematical apparatus of cognitive modeling. The problem of identifying a fuzzy cognitive map and the methods currently used to solve it are considered. A number of problems of known identification methods are indicated, which justifies the relevance of developing a new method. The main ideas of the proposed identification method are described, designed to solve the identified problems and based on the representation of knowledge about the modeled system in the form of a set of formalized rules and on the use of a genetic algorithm for selecting the optimal structure and parameters of a fuzzy cognitive map. An example of the use of some of the ideas underlying the method is considered, and the main directions for the design and development of the method are indicated.

*Keywords:* cognitive modeling, fuzzy cognitive map, cognitive model identification, evolutionary computation, genetic algorithms.

### Введение

Нечеткие когнитивные карты (НКК) – это инструмент, используемый для моделирования нечетких и слабо структурированных знаний и представлений в различных областях. Они позволяют описывать отношения и взаимосвязи между факторами некоторой предметной области с применением аппарата теории нечетких множеств, что позволяет учесть неопределенность и субъективность в знаниях специалистов в данной области. Главное назначение НКК – помощь в анализе ситуаций и принятии решений, понимании сложных проблем и структурированном представлении информации в экономике, социологии, бизнесе и прочих сферах [1].

Нечеткая когнитивная карта отражает представление эксперта (или группы экспертов) о моделируемой системе или проблеме и представляет собой набор концептов (факторов, описывающих исследуемую проблему), между которыми заданы отношения влияния (характеризующиеся направлением, знаком и интенсивностью). Процесс использования НКК начинается с ее построения (идентификации), после чего к построенной НКК применяются различные формальные методы, направленные на выявление особенностей структуры и закономерностей функционирования моделируемой системы или ситуации [2].

Настоящая статья посвящена изложению основных идей нового метода, который предлагается использовать на этапе идентификации нечетких когнитивных карт.

### **Существующие подходы к идентификации нечетких когнитивных карт**

Идентификация нечетких когнитивных карт – это процесс качественного и количественного определения взаимосвязей между концептами нечеткой когнитивной карты на основе имеющихся данных о моделируемой системе или ситуации. При этом такие данные могут быть представлены в следующих основных формах:

- знания экспертов в соответствующей предметной области;
- ретроспективная (статистическая) информация, обычно описывающая количественные показатели системы.

В рамках процесса идентификации НКК можно выделить два этапа:

- структурной идентификацией называется установление непосредственных взаимосвязей между концептами;
- параметрической идентификацией называется определение знаков и интенсивности влияний между непосредственно связанными концептами.

Идентификация НКК, в соответствии с формами используемых данных, может осуществляться на основе двух классов методов: экспертных и статистических.

Экспертные методы основываются на способности эксперта сформулировать свои знания о рассматриваемой системе путем ответов на вопросы о тех или иных ее аспектах. При этом форма таких вопросов строго определяется конкретным методом – так, успешно применяются метод парных сравнений и метод множеств уровня [3].

Статистические методы, в зависимости от формы имеющейся статистической информации, могут быть основаны, в случае пространственной выборки, на линейной регрессионной модели, или, в случае временных рядов, на моделях их обработки [4].

Ввиду разнородности имеющихся данных об устройстве и функционировании сложных систем, распространенной практикой является комбинирование указанных методов. При этом почти все перечисленные методы используются на этапе параметрической идентификации. Структурная идентификация становится возможной на основе обработки временных рядов, которые в наличии имеются не всегда – поэтому данный этап чаще выполняется экспертами «вручную», без применения формальных методов.

С учетом сказанного, практика применения, в том числе совместного, представленных методов характеризуется рядом проблем и ограничений.

Во-первых, экспертные методы существенно ограничивают разнообразие типов и форм знаний эксперта, которые могут быть обработаны и внесены в когнитивную модель в формализованном виде. Это приводит к тому, что значительная часть экспертных знаний о системе либо переносится в когнитивную модель неформально (что негативно влияет на корректность такого переноса и на их внутреннюю согласованность – в частности, это характерно для этапа структурной идентификации), либо вообще не отображается в модели (что снижает ее качество).

Во-вторых, совместное применение методов разных классов влечет за собой необходимость согласования их результатов. Используемые при этом техники [4] допускают весьма произвольное применение и могут приводить к серьезному снижению обоснованности получаемых параметров НКК.

В-третьих, важным и, во многом, вынужденным этапом построения когнитивной модели является ее верификация, целью которой является обнаружение и исправление допущенных в ходе идентификации НКК ошибок, неполноты и противоречий. Процесс верификации использует различные техники [5] и является весьма трудоемким, при этом не гаран-

тируя обнаружения всех возможных ошибок. Механизмы, автоматизирующие выявление факта наличия ошибок и противоречий в НКК, отсутствуют.

Таким образом, целесообразной является разработка нового метода идентификации нечетких когнитивных карт, поддерживающего следующие возможности.

- Совместный учет разнородной (как экспертной, так и статистической, в том числе представленной в разных формах) информации о моделируемой системе в рамках некоторого единого механизма. При этом метод должен быть работоспособным и в ситуациях наличия лишь одного из видов данных.

- Проведение и структурной, и параметрической идентификации НКК – как совместно, так и по отдельности. При этом в процессе структурной идентификации должны, по возможности, использоваться экспертные знания, а не только статистическая информация.

- Наличие встроенного механизма поддержки верификации путем выявления противоречия модели имеющимся данным и оценки степени противоречия.

### **Основные идеи предлагаемого метода идентификации нечетких когнитивных карт**

Предлагаемый метод основан на следующих ключевых идеях:

- представление всей имеющейся информации о моделируемой системе или ситуации в виде набора формализованных правил;
- формирование на основе указанного набора правил некоторой функции, вычисляющей количественную оценку степени согласованности структуры и параметров произвольной НКК с заданным набором;
- подбор оптимальных структуры и параметров НКК посредством эволюционных вычислений с применением генетического алгоритма [6], использующего указанную функцию в качестве функции приспособленности.

Таким образом, первоочередной задачей является разработка набора правил, формализующих имеющуюся информацию о системе, объединяющего экспертные и статистические данные.

Правила можно классифицировать по нескольким признакам:

- затрагивающие один, два или большее число концептов;
- качественные (выполняется/не выполняется) и количественные;
- экспертные и статистические.

На неформальном уровне примерами правил могут служить следующие высказывания.

- Концепт А имеет непосредственную связь с концептом Б.
- Концепт А влияет на концепт Б.
- Характер изменения концептов А и Б аналогичен.
- При росте значения концепта А значение концепта Б уменьшается.
- Значение концепта А должно соответствовать статистическим данным.

Первые два правила описывают качественное экспертное знание о паре концептов – наличие прямой или хотя бы косвенной связи. Следующая пара правил описывает количественные экспертные знания о паре концептов – они могут являться признаком наличия связи между концептами или описывать какую-либо закономерность в системе. Последнее правило указывает на необходимость учета имеющихся статистических данных о конкретном концепте.

Основным требованием к подобным правилам является следующее: при наличии информации о структуре и параметрах НКК должна иметься возможность однозначно определить степень соответствия данной НКК каждому из правил. Степени соответствия НКК

имеющимся правилам далее будут взяты за основу функции приспособленности, используемой в генетическом алгоритме.

Механизм количественной оценки соответствия НКК заданным правилам позволяет решать другую задачу – выявлять возможное противоречие НКК имеющимся данным и оценивать его степень. Для конкретного набора правил следует считать наилучшей ту НКК, которая имеет наивысшее значение функции приспособленности, построенной на основе этого набора. Благодаря этому появляется возможность косвенно обнаруживать противоречия между разными фрагментами знаний о системе: в случае, если значение функции приспособленности невысоко (например, не более половины от максимально возможной) и не растет в процессе смены многих поколений генетического алгоритма, то можно говорить о несогласованности правил.

В целом, гибкость задания правил и наличие механизма определения их фактической выполнимости позволит эксперту при необходимости формировать правила на основе своих гипотез о системе и далее проверять достоверность этих гипотез.

### Пример использования отдельных идей предлагаемого метода

Пусть требуется решить задачу параметрической идентификации некоторой НКК, то есть, набор концептов, а также наличие и направление влияний между ними уже известны. Рассмотрим саму нечеткую когнитивную карту, набор правил и два варианта идентификации параметров НКК, затем покажем на неформальном уровне, как выявить лучший из них на основе заданных правил.

Пусть в составе НКК представлен следующий набор концептов:

1. Себестоимость продукта.
2. Прибыль.
3. Затраты на производство.
4. Затраты на рекламу.
5. Заинтересованность покупателя.

Также задан набор правил, составленный экспертом:

1. Увеличение себестоимости продукта негативно влияет на заинтересованность в нем покупателя.
2. Увеличение затрат на производство уменьшит прибыль.
3. Прибыль должна иметь тренд роста, иногда уменьшаясь.

Пусть имеются два варианта идентификации НКК (рис. 1-2), при этом вариант А для более наглядной демонстрации составлен так, чтобы заведомо лучше соответствовать правилам, чем вариант Б.

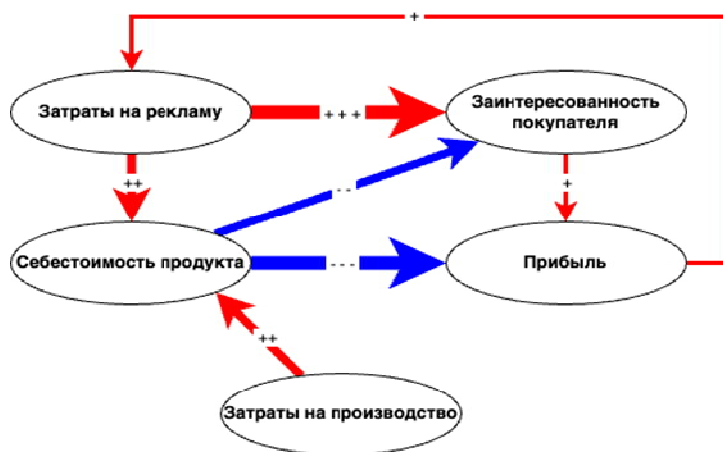


Рис. 2. Вариант идентификации А

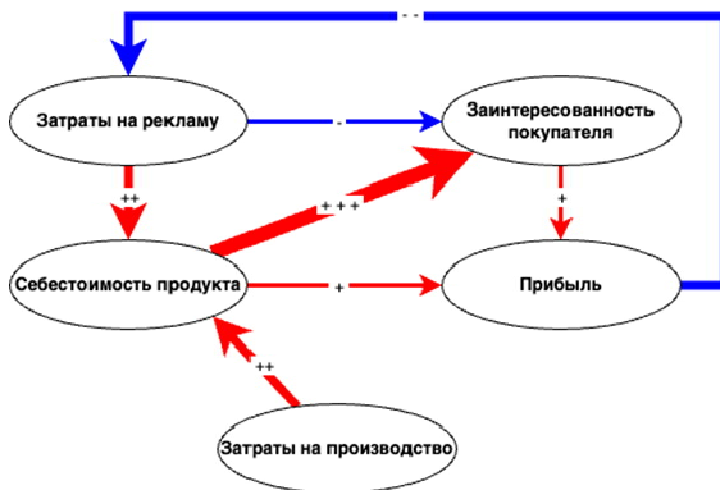


Рис. 3. Вариант идентификации Б

Проанализировав представленные НКК по каждому из правил, получим следующие выводы.

- Вариант А предполагает падение заинтересованности покупателя при росте себестоимости, вариант Б – рост при тех же условиях. Таким образом, правилу 1 лучше соответствует вариант А.
- Вариант А предполагает падение прибыли при увеличении затрат на производство, вариант Б – рост. Правилу 2 также лучше соответствует вариант А.
- Вариант А предполагает, что в случае роста прибыли последующий рост будет замедлен за счет повышения себестоимости производства (ввиду роста затрат на рекламу), а в случае падения прибыли снижение будет компенсировано снижением затрат на рекламу. Таким образом, получаем колеблющуюся модель прибыли, описанную в правиле 3.
- Вариант Б предполагает, что рост прибыли будет значительно уменьшать себестоимость продукта и заинтересованность покупателей (за счет снижения затрат на рекламу), что будет приводить к замедлению роста прибыли. В случае падения прибыли снижение будет компенсировано аналогично варианту А (с точностью до знака изменений). Таким образом, вариант Б также предполагает колебания прибыли в соответствии с правилом 3.

Как можно видеть, два правила из трех указывают на преимущество первого варианта идентификации НКК, при этом последнему правилу удовлетворяют оба варианта. Таким образом, для дальнейшего уточнения параметров рассматриваемой НКК целесообразно брать за основу именно вариант А.

### План развития предложенного метода

В ходе дальнейшей работы над предложенным методом предполагается выполнение исследований в нескольких направлениях.

Ключевой задачей является формализация возможных видов информации о системе. Так, на данный момент проведена формализация более чем десятка правил, связанных, в основном, с описанием экспертных знаний о влияниях концептов – однако нельзя утверждать, что текущий набор является исчерпывающим. Для обработки статистической информации разработано только одно правило – минимизация расхождения фактических результатов моделирования НКК с имеющимися ретроспективными данными, и предполагается появление новых правил в процессе дальнейшего исследования.

Для обеспечения работы генетического алгоритма потребуется разработать, в первую очередь, формат кодирования особи (хранящей в закодированном виде информацию о струк-



туре и параметрах НКК) и функцию приспособленности. Разработка последней, в частности, подразумевает решение задачи совместного учета различных форм знаний о моделируемой системе, задаваемых набором различных правил. Кроме того, разработка интеллектуальных операторов скрещивания и мутации для генетического алгоритма позволит ускорить сходжение процесса поиска оптимальных структуры и параметров НКК. Под интеллектуальностью здесь понимается существенный учет и использование особенностей структуры особи и функции приспособленности для повышения эффективности работы указанных операторов. Перспективным также видится использование и анализ промежуточных данных симуляции значений концептов совместно со статистическими данными по этим же концептам.

Предполагается, что предлагаемый метод будет программно реализован в форме модуля для СППР на основе нечетких когнитивных моделей «ИГЛА» [2]. Программная реализация будет включать в себя набор пользовательских интерфейсов для составления правил, примеры имплементации таких правил, алгоритмы работы со статистическими данными, а также собственно генетический алгоритм идентификации структуры и параметров НКК.

### Выводы

В данной статье был рассмотрен ряд существующих методов идентификации нечетких когнитивных карт, выявлены проблемы, возникающие при их применении, и сформулированы требования к новому методу. Далее были описаны ключевые концептуальные идеи нового метода идентификации, основанного на использовании набора формализованных правил и генетического алгоритма, и призванного решить выявленные проблемы. Кроме того, был рассмотрен пример использования идей, положенных в основу метода, а также указаны основные направления разработки и развития метода.

Предлагаемый метод выглядит перспективным как с точки зрения решаемых с его помощью проблем, так и с практической точки зрения: возможность оценить соответствие построенной когнитивной модели имеющимся знаниям или выдвинуть новые гипотезы о моделируемой системе видится удобным инструментом в контексте задач управления организационными системами.

### Библиографический список

1. Силов В.Б. Принятие стратегических решений в нечеткой обстановке. – М.: ИНПРО-РЕС, 1995.
2. Захарова А.А., Подвесовский А.Г., Исаев Р.А. Нечеткие когнитивные модели в управлении слабоструктурированными социально-экономическими системами // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2020. № 4 (20). С. 5-23. DOI:10.38028/ESI.2020.20.4.001
3. Ерохин Д.В. Стратегическое управление инновационной деятельностью предприятия: монография / Д.В. Ерохин, Д.Г. Лагерев, Е.А. Ларичева, А.Г. Подвесовский. – Брянск: БГТУ, 2010. – 196 с.
4. Подвесовский А.Г., Исаев Р.А. Идентификация структуры и параметров нечетких когнитивных моделей: экспертные и статистические методы // International Journal of Open Information Technologies. – 2019. – Т. 7. – № 6. – С. 35-61.
5. Исаев Р.А., Подвесовский А.Г. Верификация причинно-следственных связей в когнитивных моделях на основе применения метафор визуализации нечетких когнитивных карт // Научная визуализация. 2020. Т. 12. № 4. С. 1-8. DOI: 10.26583/sv.12.4.01
6. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учебное пособие. – Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 446 с.

УДК 004.05; ГРНТИ 20.51.17

## ПРИМЕНЕНИЕ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

А.М. Гаушко

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,  
Российская Федерация, Рязань, sahaqau@gmail.com

*Аннотация.* Выполнено сравнение двух современных навигационных систем: GPS, ГЛОНАСС. Сравняется точность определения координат, их характеристики, область применения.

*Ключевые слова:* спутниковая навигация, GPS, ГЛОНАСС.

## THE USE OF SATELLITE NAVIGATION TO SOLVE POSITIONING PROBLEMS

A.M. Gaushko

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,  
Russia, Ryazan, sahaqau@gmail.com

*The summary.* Two modern navigation systems are compared: GPS, GLONASS. The accuracy of determining coordinates, their characteristics, and the scope of application are compared.

*Keywords:* satellite navigation, GPS, GLONASS.

### Введение

Спутниковая навигация стала неотъемлемой частью современной жизни. Она обеспечивает определение местоположения объектов, направление их движения, позволяет формировать измерительные данные, которые могут использоваться в различных областях (от автомобильной навигации до геодезии и телекоммуникаций).

### Основная часть

Цель данного исследования заключается в выявлении применимости систем GPS и ГЛОНАСС, а также их сравнение.

Задачи позиционирования в системах GPS и ГЛОНАСС включают:

1. Автомобильная навигация: определение текущего местоположения автомобиля и предоставление маршрутных указаний для достижения заданного пункта назначения.

В большинстве случаев GPS предоставляет надежное и точное позиционирование для автомобильной навигации. Системы GPS широко распространены в автомобилях по всему миру.

В российских регионах ГЛОНАСС предоставляет более стабильное покрытие и лучшую точность, что делает его предпочтительным выбором в России.

2. Воздушная навигация: использование GPS и ГЛОНАСС в авиации для определения позиции воздушного судна и навигации по воздушным маршрутам.

Многие воздушные суда используют и GPS, и ГЛОНАСС для повышения точности и надежности. Это особенно важно в критических ситуациях, таких как посадка и навигация в условиях плохой видимости.

Современные авиационные системы могут автоматически переключаться между сигналами GPS и ГЛОНАСС в зависимости от их доступности и качества сигнала. В случае потери сигнала от одной из систем, другая может использоваться как резерв.

3. Морские навигационные системы: позиционирование судов и других морских средств передвижения для обеспечения безопасности и оптимизации морской навигации.

Как и в воздушной навигации, GPS и ГЛОНАСС предоставляют координаты местоположения судов на открытом море и в прибрежных водах. Они входят в Автоматизированную систему управления судном (AIS), которая предоставляет информацию о местоположении, курсе, скорости и других данных судна. Это снижает риск столкновений и повышает безопасность в морской навигации.

4. Геологические исследования: определение координат и позиции для исследования геологических объектов, таких как пласты, рудные месторождения или геологические структуры.

В геологии GPS и ГЛОНАСС наиболее часто используются для мониторинга движения грунта в результате геодинамических процессов, таких как обвалы, оползни и другие изменения ландшафта, при изучении подземных вод и гидрогеологических процессов [1]. Они помогают определить точные координаты и глубину скважин, а также создавать карты распределения водных ресурсов.

5. Геодезия и картография: определение точных координат и высот в геодезии для создания и обновления карт, измерений земельных участков и других геодезических задач.

Беспилотные аппараты снабжаются GPS и ГЛОНАСС для выполнения аэрофотосъемок и геологического картографирования. Это позволяет быстро и эффективно получать высокоточные данные о местности.

6. Робототехника: позиционирование роботов и автономных систем для выполнения различных задач в промышленности.

GPS и ГЛОНАСС предоставляют роботам точные координаты местоположения в реальном времени. Это позволяет им определять свое положение на поверхности Земли и строить оптимальные маршруты для достижения заданной цели.

Системы GPS и ГЛОНАСС имеют схожие основные задачи позиционирования, но существуют некоторые различия между ними (таблица 1).

Точность определения координат в системе GPS и ГЛОНАСС зависит от нескольких факторов, таких как число видимых спутников, расстояние до спутников, препятствия и атмосферные условия.

Таблица 1. Сравнение навигационных систем GPS и ГЛОНАСС

	Система GPS	Система ГЛОНАСС
Покрытие	GPS - это американская система. Она обеспечивает широкое покрытие, включая большую часть Земли.	ГЛОНАСС сфокусирована в основном на России и прилегающих территориях.
Количество спутников	По состоянию на 2020 год по целевому назначению используется 31 космический аппарат	По состоянию на 2020 год по целевому назначению используется 24 космических аппарата
Частота сигнала	Сигнал GPS работает на двух основных частотах: L1 (1572,42 МГц), L2 (1176,45 МГц).	Сигнал Глонасс использует частоты L1(1602 МГц) и L2(1256МГц)

Считается, что система GPS имеет более высокую точность определения координат, чем ГЛОНАСС. Как правило, точность GPS составляет около 2-4 метров, в то время как точность ГЛОНАСС составляет около 3-6 метров [2]. Однако, точность определения координат может варьироваться в зависимости от места и времени. Например, на широте Москвы максимальную точность сейчас обеспечивает GPS, в то время как в Мурманске по этому параметру лидером станет ГЛОНАСС. В некоторых случаях, когда требуется высокая точность, например, в геодезии или в автоматизированных системах управления, может потребоваться использование дополнительных методов и технологий для улучшения точности определения координат.

Негативно на точности определения может сказаться фактор помех, приему сигнала могут помешать магнитные бури или искусственно созданные помехи, так называемые глушители GPS, которые генерируют определённый сигнал в заданной зоне, в следствие чего работа GPS устройств в этой зоне невозможна [3].

### Выводы

Системы GPS и ГЛОНАСС имеют схожие основные задачи позиционирования, но есть различия в их покрытии, количестве спутников, частотах сигналов, доступности и точности.

Основным преимуществом GPS является почти 100-процентное покрытие территории Земли, но ГЛОНАСС особенно полезен в России, так как покрывает полностью всю её территорию и при бесперебойной работе, в отличие от GPS, не требует корректировки.

Несмотря на свои преимущества, как у GPS, так и у ГЛОНАСС, обе системы также имеют свои недостатки. В городах или местах с плотной застройкой зданий сигналы GPS и ГЛОНАСС могут отражаться от зданий, что приводит к множественным отражениям и ухудшению точности. Также время от времени спутники могут выходить из строя или требовать обслуживания, что может привести к временным проблемам с доступностью системы и ухудшению ее точности.

Точность позиционирования обеих систем может варьироваться и зависит от различных факторов. В некоторых случаях использование обеих систем вместе или комбинация с другими системами может привести к повышению точности и надежности позиционирования. Выбор системы для конкретной задачи позиционирования зависит от требований и условий использования.

### Библиографический список

1. Габсатаров Ю.В., Владимирова И.С., Сдельникова И.А. Геодинамический мониторинг в ФИЦ ЕГС РАН: современное состояние и перспективы развития // Российский сейсмологический журнал. – 2022. – Т. 4, № 4. – С. 7–23. DOI: 10.35540/2686-7907.2022.4.01. – EDN:MHBLYM.
2. А. Сорокин. ГЛОНАСС vs GPS: с какими трудностями столкнулась отечественная система спутниковой навигации: [Электронный ресурс] URL: <https://onlinepatent.ru/journal/glonass-gps-future/> (дата обращения 21.12.2023).
3. GPS Accuracy: [Электронный ресурс] URL: <https://www.gps.gov/systems/gps/performance/accuracy> (дата обращения 21.12.2023).

УДК 004.02; ГРНТИ 55.30.51

## ОПТИМИЗАЦИЯ НАЗНАЧЕНИЯ ЗАДАНИЙ ДЛЯ СКЛАДСКИХ РОБОТОВ

М.Ю. Пшибло, Р.А. Исаев

*Брянский государственный технический университет,  
Российская Федерация, Брянск, pshblo.max@gmail.com*

*Аннотация.* Статья посвящена постановке актуальной прикладной задачи, связанной с управлением складскими роботами. Рассмотрены мобильные роботы, которые используются на складах для перемещения контейнеров с товарами. Описаны общие идеи работы системы управления роботами и рассмотрена задача оптимизации назначения заданий роботам. Показано, что решение данной задачи подразумевает разработку комплексного решения, обеспечивающего высокую степень адаптивности и эффективности в динамичной среде склада. Сформулирована цель связанных с задачей исследований и представлен план работ для ее достижения. Предполагается, что целевое решение будет представлять собой отдельный сервис для оптимизации порядка выполнения заданий и распределения заданий между роботами.

*Ключевые слова:* робототехника, складские роботы, складская логистика, оптимизация пути.

## TASK ASSIGNMENT OPTIMIZATION FOR WAREHOUSE ROBOTS

M.Y. Pshiblo, R.A. Isaev

Bryansk State Technical University,  
Russian Federation, Bryansk, pshblo.max@gmail.com

*Abstract.* The article is devoted to the formulation of an actual applied problem related to the control of warehouse robots. Mobile robots that are used in warehouses to move containers with goods are considered. The general ideas of the operation of the robot control system are described and the problem of optimizing the assignment of tasks to robots is considered. It is shown that solving this problem involves developing a comprehensive solution that provides a high degree of adaptability and efficiency in a dynamic warehouse environment. The goal of the research related to the problem is formulated and a work plan to achieve it is presented. It is assumed that the target solution will be a separate service for optimizing the order of tasks and distributing tasks between robots.

*Keywords:* robotics, warehouse robots, warehouse logistics, path optimization.

### Введение

В современном мире автоматизация работы склада играет ключевую роль для оптимизации всех логистических процессов в компании, занимающейся хранением или перевозкой товаров. Это становится непреложной необходимостью в условиях высокой конкуренции и постоянно растущих требований к оперативности, качеству обслуживания и уменьшению затрат. Автоматизация позволяет не только существенно повысить эффективность работы склада, но и минимизировать риск ошибок, которые могут возникнуть при ручном ведении учета или ручной обработке товаров.

Среди методов автоматизации работы склада особенно выделяются решения в области складской робототехники. Данный сегмент технологий переживает настоящий бум, поскольку роботизированные системы способны обеспечивать высокую производительность при одновременном снижении затрат. Роботы, используемые на складах, способны выполнять широкий спектр задач: от разгрузки товаров и перемещения их по складу до сортировки, комплектации заказов, их упаковки и инвентаризации. Они работают круглосуточно и практически без перерывов, что существенно повышает общую производительность работы.

### Применение складских роботов и управление ими

Одной из основных сложностей, связанных с хранением товаров на складе, является необходимость эффективно распределять товары по местам хранения и обеспечивать их оперативную выдачу по мере поступления запросов. В этом контексте, роботизированные технологии предлагают решения, превосходящие возможности человеческого труда по скорости выполнения задач. Среди различного роботизированного оборудования особое внимание стоит уделить мобильным роботам, способным автономно перемещать контейнеры с товарами к местам их последующего использования или хранения [1].

Такой мобильный робот оснащен мачтой, оборудованной слотами для контейнеров (рис. 1). Эти контейнеры отбираются в соответствии с поставленной задачей, после чего робот перевозит их в заданное место на складе. Робот двигается в пространстве с многоэтажными стеллажами, где хранятся контейнеры (рис. 2). Каждый контейнер в системе имеет определенное место – либо в ячейке стеллажа, либо на слоте мобильного робота при перемещении.



Рис. 1. Общий вид мобильного робота

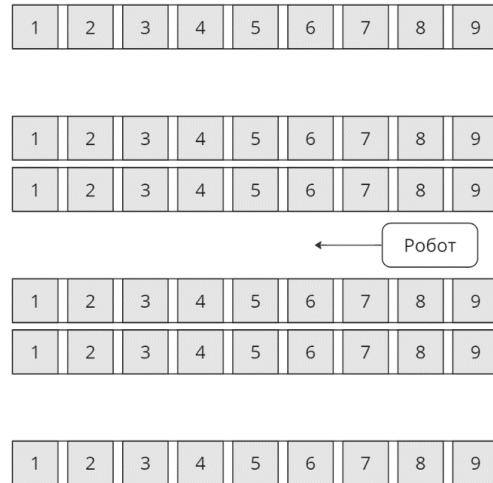


Рис. 2. Примерная схема пространства, в котором перемещается мобильный робот

Чтобы робот начал работу, ему необходимо передать задание или множество упорядоченных заданий. Задания для данного робота регламентируются строгим API:

1. Команда TAKE (локация, номер слота) – взять контейнер из ячейки и положить на определенный слот.
2. Команда PUT (локация, номер слота) – положить контейнер из определенного слота в ячейку.

Задания для имеющихся в наличии роботов обычно распределяются через специализированный сервис, известный как система управления роботами (RMS – Robot Management System). Эта система собирает и обрабатывает информацию о каждом роботе, его текущем состоянии и о задачах, которые он выполняет. Данный метод управления называется централизованной стратегией координации действий роя роботов [2]. В дополнение, данная система управления также хранит в себе детальную метаинформацию о поступающих заданиях. Задания на перемещение контейнеров поступают в RMS из внешних источников, после чего система распределяет их между роботами упорядоченным списком. Общая схема данного процесса представлена на рисунке 3.

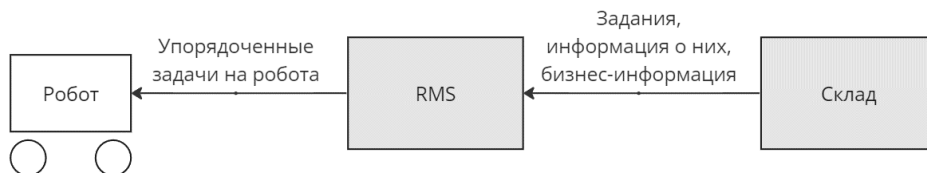


Рис. 3. Схема работы RMS

### Оптимизация порядка выполнения заданий для складских роботов

Исходя из вышеизложенного, возникает задача оптимизации порядка выполнения заданий, назначаемых роботу. При этом необходимо не только рассматривать оптимальные в геометрическом отношении пути, но и принимать во внимание информацию о самих заданиях, их приоритетах, общей системе управления, загруженности выдач и других составляющих. Таким образом, возникает необходимость в глубоком анализе данной задачи и разработке механизма оптимизации, учитывающего множество факторов.

При более детальном рассмотрении этой задачи следует отметить, что задания для роботов могут быть условно разделены на две основные группы:

- отправить контейнер на хранение с зоны приема;
- отправить контейнер на отбор из зоны хранения.

Данные группы могут подразделяться еще на несколько подгрупп, но с точки зрения требуемой оптимизации это разделение второстепенно.

Также может возникать необходимость динамической корректировки приоритетов заданий в зависимости от текущей загруженности склада – и этот аспект может стать ключевым для повышения эффективности работы мобильных роботов.

Для оптимизации процесса упорядочивания заданий предлагается разработать алгоритм, способный оценивать вес (показатель относительной важности) каждого задания, основываясь на текущем состоянии системы, приоритете задания, его местоположении и положении робота. Это означает, что наряду с алгоритмом определения оптимального маршрута, потребуется разработка более комплексного и настраиваемого решения, обеспечивающего высокую степень адаптивности и эффективности в динамичной среде склада.

Таким образом, можно выделить ряд этапов, которые требуется реализовать.

1. Установка задачам бизнес-приоритетов, которые могут быть получены из метаданных о задании (примерами могут служить приоритет отгрузки, срочность задачи и другое).
2. Установка задачам физических приоритетов на основе учета расположения роботов и контейнеров на карте.
3. Распределение задач на несколько роботов, с учетом выставленных ранее приоритетов.
4. Планирование порядка выполнения задач для каждого робота.

Перечисленные компоненты показаны на рисунке 4.

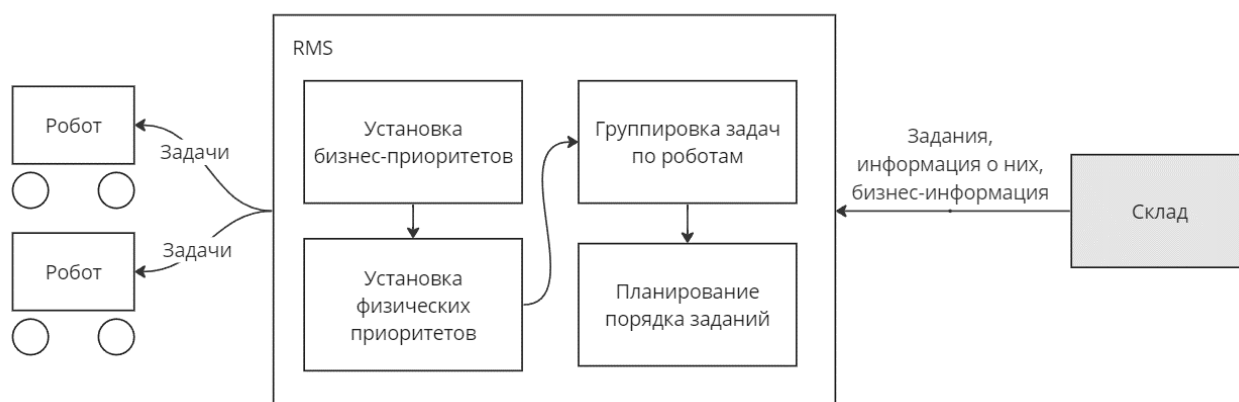


Рис. 4. Схема работы RMS с детализацией планируемых компонентов и с учетом возможности управления несколькими роботами

Для назначения приоритетов для каждой задачи их нужно унифицировать, то есть привести к единому виду. Для этого планируется реализовать систему весов приоритетов, которая охватывает установку бизнес-приоритетов и физических приоритетов. Данная система предполагает задание приоритетов в диапазоне от 0 до 1, где 1 – наименьший, 0 – наибольший приоритет, при этом приоритеты можно умножать друг на друга. Благодаря этому каждая установка приоритетов, будь то физические или бизнес-приоритеты, может быть реализована как калькулятор приоритета.

Изначально всем задачам на входе устанавливается минимальный приоритет, то есть 1. Далее каждая задача подается на вход калькулятору, который назначает задаче свой приоритет, перемножая на уже выданный приоритет. Для конфигурации также имеет смысл учитывать коэффициент важности калькулятора, благодаря чему становится возможным контролировать его влияние на приоритетность задач. Принцип работы калькуляторов схематично приведен на рисунке 5. Пример расчета приоритета показан на рисунке 6.

Благодаря установке приоритетов имеется возможность учитывать их на этапе распределения задач и планировании порядка задач. Для этого могут подойти такие классические алгоритмы, как A\* или Дейкстра, но скорее следует обратить внимание на их модификации – поскольку в планировании порядка участвуют приоритеты задач, а также «буфер» в виде слотов на работе.

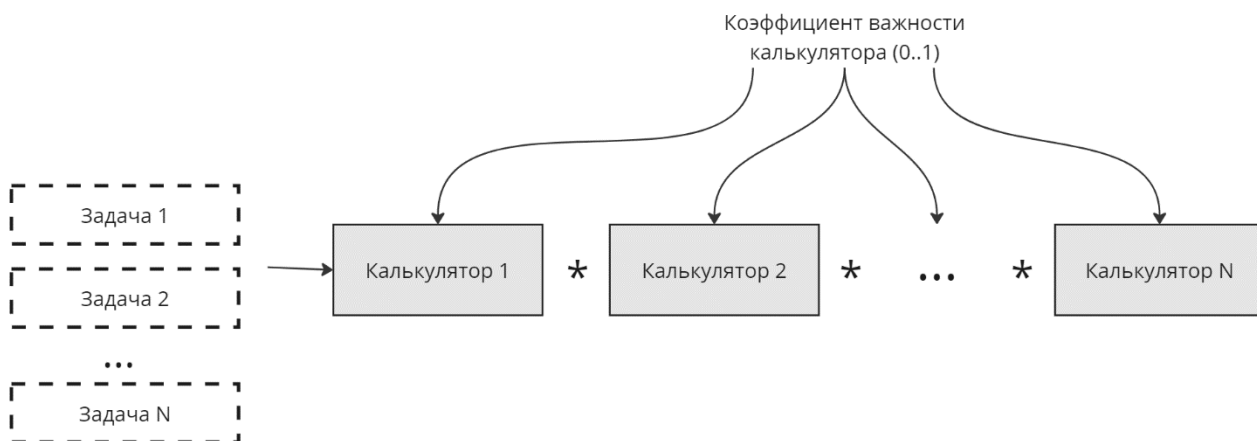


Рис. 5. Схема работы калькуляторов приоритетов

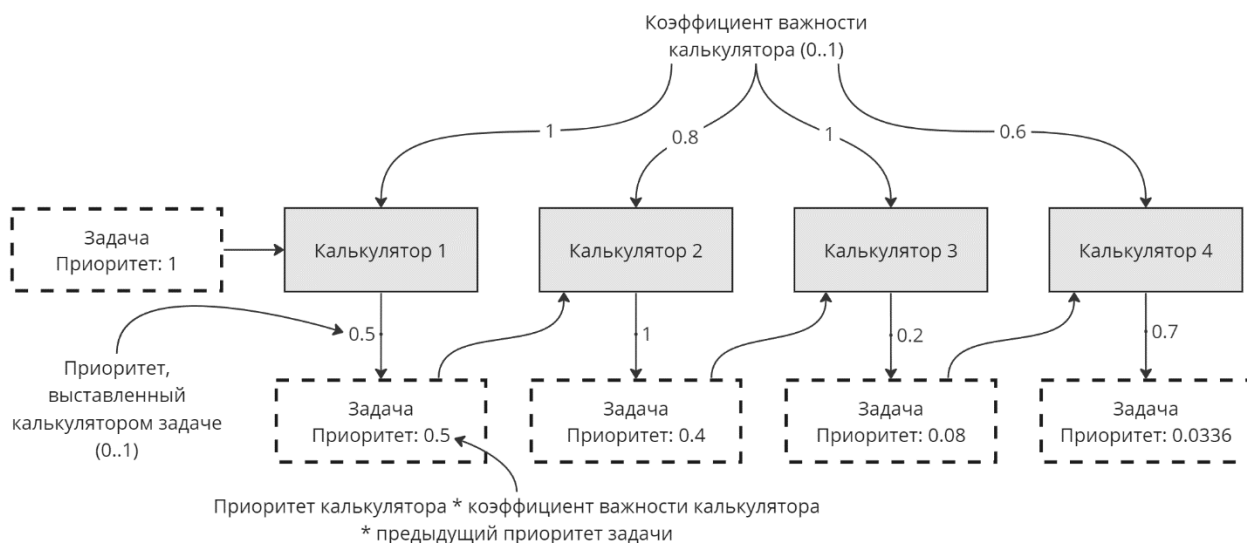


Рис. 6. Пример работы системы с калькуляторами приоритетов



Итак, цель предстоящего исследования – реализовать алгоритмы распределения и упорядочивания задач для складских роботов и экспериментальным путем выявить среди них наиболее эффективный.

Приведем план исследований, направленных на достижение поставленной цели.

1. Обзор существующих потенциально пригодных алгоритмов оптимизации, планирования и поиска пути, включая классические алгоритмы Дейкстры,  $A^*$ , но не ограничиваясь ими [3-5]. А также обзор их модификаций для реализации распределения заданий между роботами.

2. Определение и формализация критериев оценки алгоритмов, таких как качество оптимизации, скорость работы, простота реализации, возможность динамического обновления весов заданий и маршрутов, а также адаптивность к изменяющимся условиям склада.

3. Реализация выбранных алгоритмов для начального тестирования и сравнения их эффективности в симулированных условиях, максимально приближенных к реальным.

4. Анализ результатов тестирования с целью выбора алгоритма, лучше всего соответствующего поставленным условиям и требованиям.

5. Доработка и оптимизация выбранного алгоритма для его дальнейшей интеграции в систему управления роботами.

Для количественной оценки качества оптимизации следует определить и формализовать целевые функции, примерами которых могут служить следующие:

- минимизация суммарного расстояния, пройденного всеми роботами;
- минимизация суммарного времени простоя роботов (в том числе по причине ожидания других роботов).

Отметим, что объективная оценка качества оптимизации целевых функций возможна в условиях усредненного количества задач для роботов. В условиях реального эксперимента для усреднения параметров заказов потребовалось бы ждать длительное время. Ввиду этого целесообразно оценивать качество оптимизации в условиях симуляции. При этом задачи для всех видов алгоритмов должны быть одинаковые.

Кроме того, следует учитывать простоту реализации, а также адаптивность выбранного решения. Простоту реализации можно оценить по количественной метрике «цикломатическая сложность», основанной на количестве линейно независимых путей в коде программы. Более низкая цикломатическая сложность указывает на меньшее количество возможных путей исполнения и, следовательно, может говорить о более простой структуре программы. Адаптивность решения можно определять через качественную оценку конфигурации алгоритма в ходе меняющихся условий работы.

Выбранный алгоритм должен работать в уже существующей системе управления роботами, поэтому целевое решение – создать отдельный сервис для оптимизации порядка выполнения задач и распределения задач между роботами (рис. 7).

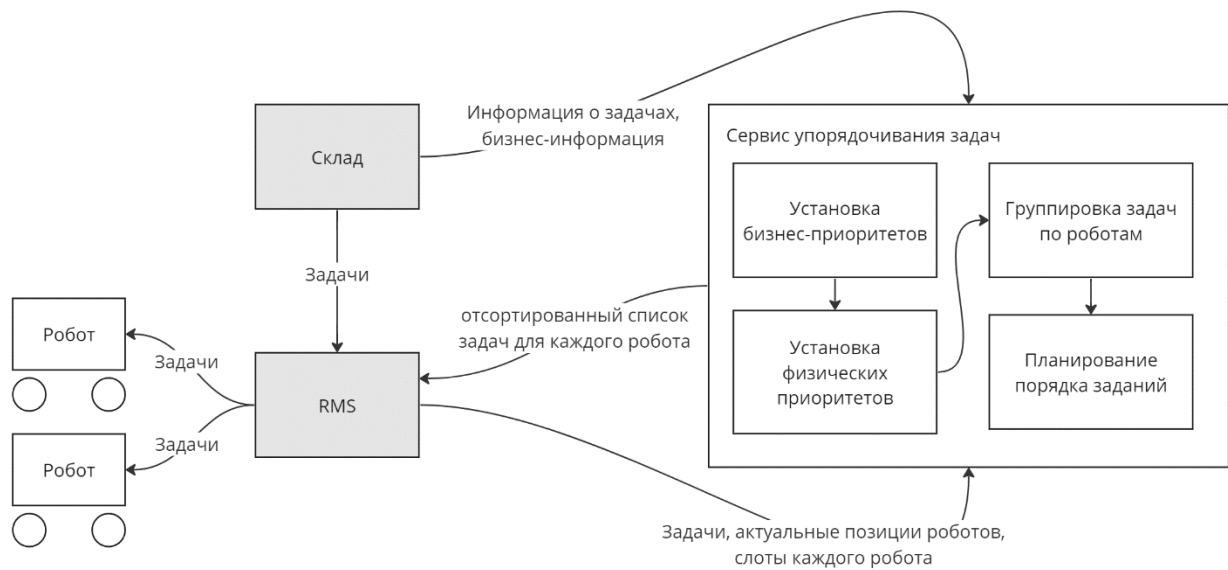


Рис. 7. Схема работы RMS с реализацией отдельного сервиса упорядочивания задач

## Выводы

Таким образом, в ходе дальнейшей работы необходимо реализовать отдельный сервис упорядочивания задач, реализовать алгоритм работы калькуляторов приоритетов, провести исследование с целью выбора оптимального алгоритма упорядочивания задач с учетом приоритетов, разработать симуляцию для оценки используемых алгоритмов оптимизации и их сравнения.

## Библиографический список

1. Тамков, П.И. Складской мобильный робот / П.И. Тамков, М.Д. Гладышев // Каспий и глобальные вызовы. – 2022. – С. 726-732.
2. Сырякин, В.И. Коллективы интеллектуальных роботов. Сферы применения / В.И. Сырякин // Т.: STT. – 2018. – 140 с.
3. Воробьев В.В. Алгоритм поиска и планирования пути для задач групповой робототехники / В.В. Воробьев // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. – 2013. – С. 793-798.
4. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход. – 2-е изд.: Пер. с англ. – М.: «Вильямс». – 2006. – 1408 с.
5. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учебное пособие. – Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 446 с.

УДК 379.8: 004.9; ГРНТИ 20.51

## ТЕХНОЛОГИЯ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ НА ПУТИ К ЗДОРОВОМУ ОБРАЗУ ЖИЗНИ

**А.И. Лаврин, П.Г. Лобанов, А.Д. Шипилова, Д.А. Шабунин, К.Д. Кузнецов**

*Тамбовский Государственный технический университет,  
Российская Федерация, Тамбов, 07lavrin06@gmail.com*

*Аннотация.* В работе рассмотрены вопросы применения технологии виртуальной реальности для возможностей ознакомления с тренажёрами. Создание образовательного VR-контента основано на использовании программного пакета для разработки виртуальных туров 3D VistaVirtualTourPro.

*Ключевые слова:* наружные объекты оздоровительно-спортивной инфраструктуры; виртуальный тур; камера Insta 360 Pro; 3D VistaVirtualTourPro.

## VIRTUAL REALITY TECHNOLOGY ON THE WAY TO A HEALTHY LIFESTYLE

**A.I. Lavrin, P.G. Lobanov, A.D. Shipilova, D.A. Shabunin, K.D. Kuznetsov**

*Tambov State Technical University,  
Russian Federation, Tambov, 07lavrin06@gmail.com*

*The summary.* The paper discusses the application of virtual reality technology to provide awareness of the usage of various training apparatus. The creation of educational VR-content is based on the usage of a software package for the development of virtual tools called “3D Vista Virtual Tour Pro”

*Keywords:* outdoor recreational and sports infrastructure facilities; virtual tour; Insta 360 Pro camera; 3D Vista Virtual Tour Pro.

В наше время с большой скоростью развиваются технологии виртуальной реальности (VR), захватывая многие сферы нашей жизни, начиная от развлекательной, заканчивая медициной. Использование VR-технологий все чаще наблюдается и в спортивной сфере. Одной из таких технологий являются виртуальные туры [1 – 5].

Сегодня виртуальные туры стали одним из распространенных способов познакомиться с различными спортивными объектами. Они помогают привлечь внимание к здоровому образу жизни и физической активности, а также предоставляют возможность просмотра спортивных объектов, не выходя из дома. VR-технологии помогают не только увидеть сами объекты, но и узнать о них дополнительную информацию, такую как график работы площадки или условия пользования. Главным преимуществом виртуальных туров является их доступность и удобство [5 – 9]. Пользователь с помощью компьютера или мобильного телефона может совершать виртуальные туры в удобное для себя время и в удобном месте. Такие технологии способствуют повышению осведомленности о местах общественного пользования, связанных с физической активностью и здоровьем, позволяя получить информацию о местонахождении и комплектации спортивных площадок [1 – 14].

В связи с этим, в данной работе авторами рассмотрены вопросы создания виртуального тура по спортивно-оздоровительным объектам на примере города Тамбов. Данный виртуальный тур включает в себя сотни отснятых и сшитых панорам. Съёмка панорам происходила с помощью профессиональной камеры для панорамной съёмки Insta360 Pro, обладающей высоким качеством снимков. Монтаж тура выполнен с использования программного обеспечения системы 3D VistaVirtualTourPro. Эта программа предоставляет удобный и мощный инструментарий для создания уникальных виртуальных туров. С ее помощью можно легко и быстро собрать панорамные снимки, добавить интерактивные элементы, создавая по настоящему убедительный и запоминающийся виртуальный опыт. В нашем туре мы применили систему ссылок, которая включает в себя информацию о тренажере: 3D модель со всеми необходимыми характеристиками и видео-инструкции по применению тренажера для правильной и эффективной техники выполнения упражнений, чтобы минимизировать травмы при выполнении их самостоятельно.

На рисунке 1 представлен общий вид тренажерного комплекса, а на рисунках 2 –3 применены отдельные его составляющие. Так на рисунке 2 приведены снимки экрана, полученные во время демонстрации упражнений, выполненных профессиональными тренерами в отдельных видео роликах.

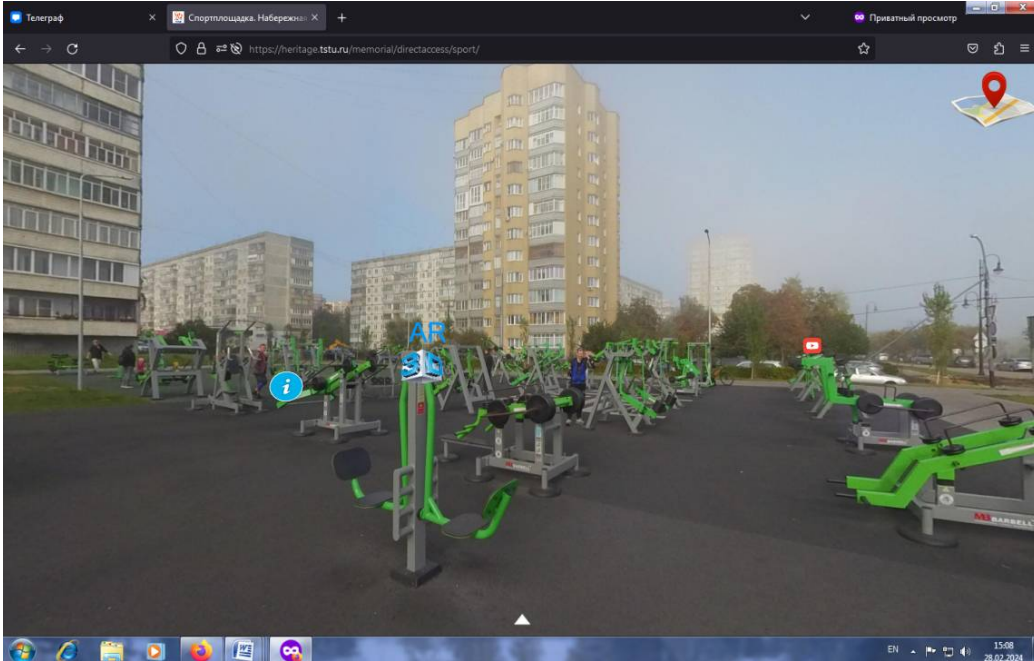


Рис. 1. Общий вид тренажерного комплекса



а)



б)



в)



г)

Рис. 2. (а-г) Снимки экрана, полученные во время демонстрации упражнений, выполненных профессиональными тренерами: приседание MB Barbell 7.65-а); жим от груди MB Barbell 7.64-б); жим вверх MB Barbell 7.63-в); мультиштанга MB Barbell 7.68-г)

Для детального ознакомления с конструкциями тренажеров пользователю предоставляется возможность познакомиться с помощью детализированных 3D-моделей (см. рис. 3).

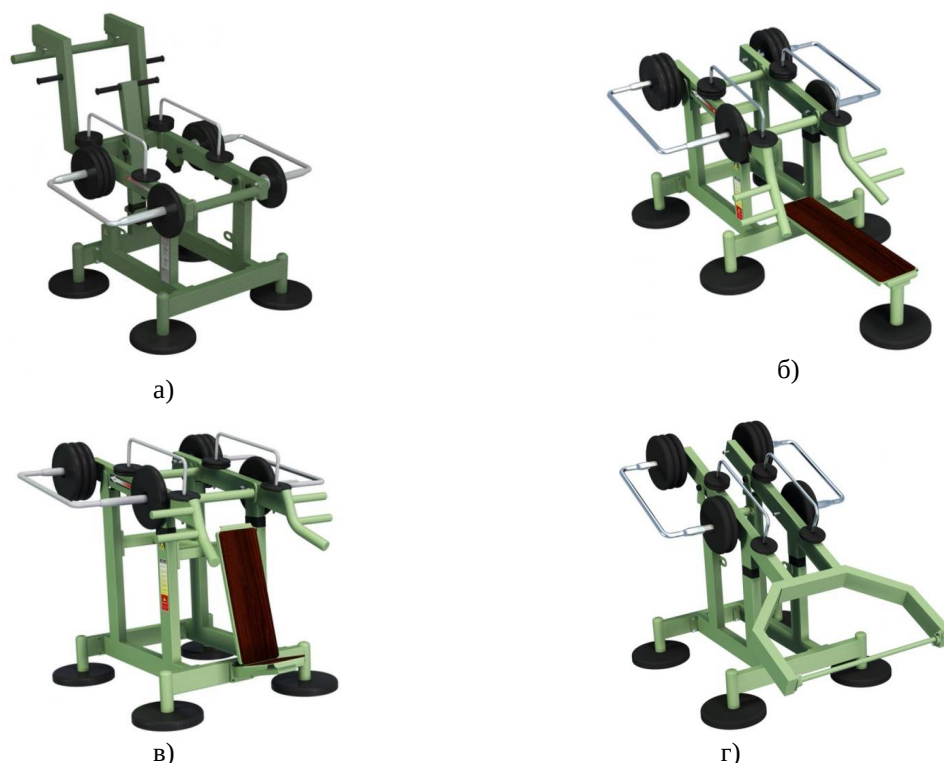


Рис. 3. (а-г) Визуализация 3D-моделей тренажеров: МВBarbell 7.65-а); МВBarbell 7.64-б); МВBarbell 7.63-в); МВBarbell 7.68-г)

Информационный ресурс разработанного виртуального тура размещен по адресу: <https://heritage.tstu.ru/memorial/directaccess/map/>

В заключении стоит сказать, что технологии виртуальной реальности являются важным инструментом, который позволяет повысить доступность и распространенность спортивных объектов в городской среде, что может стать мощным инструментом для популяризации здорового образа жизни, увеличивая безопасность и комфорт при использовании общедоступных тренажеров.

### Библиографический список

1. Гагарина, С. Н. Здоровый образ жизни населения Российской Федерации как фактор активного долголетия / С. Н. Гагарина, И. Д. Остапов // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2023. – № 1-1(76). – С. 173-177. – DOI 10.24412/2500-1000-2023-1-1-173-177. – EDN AVSUJG.
2. Колодицкая, Н. Г. Здоровый образ жизни населения как гарант успешного становления общества / Н. Г. Колодицкая // Здоровье - основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения. – 2021. – Т. 16, № 3. – С. 1095-1098. – EDNPXSXOM.
3. Зюкин, Д. А. Массовый спорт как неотъемлемый элемент реализации концепции здорового образа жизни населения / Д. А. Зюкин, Е. Е. Матушанская // Региональный вестник. – 2018. – № 6(15). – С. 11-13. – EDN YTGVKH.
4. Здоровый образ жизни – основа активного долголетия. – [Электронный ресурс]. —Режим доступа: <https://1poliklinika.ru/dlya-pacientov/meditsinskaya-profilaktika/38-stati/497-zdorovyj-obraz-zhizni-osnova-aktivnogo-dolgoletiya> (дата обращения: 17.01.2024).
5. Приказ Минздрава России от 15.01.2020 N 8 «Об утверждении Стратегии формирования здорового образа жизни населения, профилактики и контроля неинфекционных заболеваний на период до 2025 года». – [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_344362/b4565b496f8c11f50a63b08d5143df8f889c211e/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_344362/b4565b496f8c11f50a63b08d5143df8f889c211e/) (дата обращения: 17.01.2024).
6. Овчинников, Ю. Д. Эргономичная городская среда региона: спортивная многофункциональность и социальная доступность населению / Ю. Д. Овчинников, Л. В. Ермоленко, Н. К. Софьянов // Мир университетской науки: культура, образование. – 2023. – № 6. – С. 54-57. – DOI 10.18522/2658-6983-2023-6-54-57. – EDN AAQUKO.
7. Разработка интеллектуального образовательного контента / В. Г. Мокрозуб, Н. В. Молоткова, Е. С. Мищенко, К. А. Алейникова // Научно-техническая информация. Серия 2: Информационные процессы и системы. – 2022. – № 3. – С. 1-9. – DOI 10.36535/0548-0027-2022-03-1. – EDN TFEUUD

8. Немтинов, В.А. Создание виртуальной технологической лаборатории и организация обучения при подготовке кадров высшей квалификации / В.А. Немтинов, И.М. Манаенков, Ю.В. Немтинова // Высшее образование в России. - 2020. - Т. 29, № 2. С. 159-168. DOI: 10.31992/0869-3617-2020-29-2-159-168
9. Virtual Tours in E-Learning, Training & Quizzing. (2022) <https://blog.3dvista.com/2020/04/27/virtual-tours-in-e-learning-training-quizzing/>.
10. Мокрозуб, В. Г. Информационно-логические модели технических объектов и их представление в информационных системах / В. Г. Мокрозуб, В. А. Немтинов, С. Я. Егоров // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2010. – № 3. – С. 68 – 73.
11. Nemtinov, V.A. On an approach to designing a decision making system for state environmental examination / V.A. Nemtinov, Yu.V. Nemtinova // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2005. - V. 44(3). - P. 389-398.
12. Комплексное использование различных программных сред для повышения уровня визуализации и восприятия информации / В. А. Немтинов, А. А. Родина, А. Б. Борисенко [и др.] // Научная визуализация. – 2023. – Т. 15, № 2. – С. 1-10. – DOI 10.26583/sv.15.2.01. – EDN LPKBSQ.
13. Implementation of technology for creating virtual spatial-temporal models of urban development history / V. A. Nemtinov, A. B. Borisenko, Y. V. Nemtinova [et al.] // Scientific Visualization. – 2018. – Vol. 10, No. 3. – P. 99-107. – DOI 10.26583/sv.10.3.07. – EDN MSVDQT
14. Мокрозуб, В. Г. Системный анализ процессов принятия решений при разработке технологического оборудования / В. Г. Мокрозуб, Е. Н. Малыгин, С. В. Карпушкин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2017. – Т. 23, № 3. – С. 364 – 373. doi: 10.17277/vestnik.2017.03.pp.364-373.

УДК 004.94; ГРНТИ 20.51

## АРХИТЕКТУРА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПРОСМОТРА РАСПИСАНИЯ УЧЕБНЫХ ЗАНЯТИЙ

Д.Л. Сащенко

Воронежский Государственный Технический Университет,  
Российская Федерация, Воронеж, sashchenkodmitrii@mail.ru

*Аннотация.* В данной статье рассматривается проектирование информационной системы, предназначенной для просмотра расписаний учебных занятий как со стационарных, так и с мобильных устройств. Целью является разработка архитектуры данного приложения. В результате предложено описание клиентской и серверной части, а также спроектирована структура базы данных. Архитектура приложения представлена на UML и AIA диаграммах, которые продемонстрируют взаимодействие пользователя с сервисом и архитектуру интеграции приложений. Серверная часть реализована с помощью фреймворка Spring Boot, клиентская - использованием веб-фреймворка Vue и его надстройки Quasar. В качестве СУБД использована PostgreSQL. В результате получено приложение, реализованное с использованием микросервисной архитектуры и позволяющее осуществлять просмотр расписания с любых устройств. Приложение внедрено в деятельность Воронежского государственного технического университета.

*Ключевые слова:* расписание занятий, UML-диаграмма, AIA-диаграмма, микросервисная архитектура

## ARCHITECTURE OF THE INFORMATION SYSTEM FOR VIEWING CLASS SCHEDULES

D.L. Sashchenko

Voronezh State Technical University,  
Russia, Voronezh, sashchenkodmitrii@mail.ru

*The summary.* This article deals with the design of an information system for viewing class schedules from both stationary and mobile devices. The aim is to develop the architecture of this application. As a result, the description of the client and server parts is proposed, and the database structure is designed. The architecture of the application is presented in UML and AIA diagrams, which will demonstrate the interaction of the user with the service and the architecture of application integration. The server part is implemented using the Spring Boot framework, the client part using the Vue web framework and its Quasar add-on. PostgreSQL was used as a DBMS. As a result, we obtained an application implemented using microservice architecture and allowing to view



the schedule from any device. The application is implemented in the Voronezh State Technical University..

*Keywords:* student timetable, UML diagram, AIA diagram, Java, Spring Boot, Vue, Quasar, PostgreSQL.

В современную эпоху информации на первый план выходит удобство её получения, компоновка, наглядность, актуальность, а также точность. Эти принципы и правила относятся к любой сфере и не менее важны в сфере образования. Одним из основных элементов жизни любого студента и его образовательного процесса является расписание занятий. Относительно него приходится строить дальнейший день, свои планы и готовиться к занятиям, поэтому студенту важно знать актуальное расписание занятий и иметь возможность быстро его получить и понять. Разные университеты имеют различные подходы к предоставлению расписания, начиная от уже готовых онлайн-сервисов для его просмотра и заканчивая форматами отображения в виде различных файлов. Цель данного проекта заключается в создании универсального онлайн-сервиса для удобного и интерактивного просмотра расписания различных университетов с гибкими возможностями расширения.

Актуальность этого проекта обусловлена потребностью студентов, их родителей и преподавателей в быстром доступе к понятному расписанию с минимальными затратами времени на его осмысление. Помимо этого, следует отметить, что онлайн-сервис удобнее большинства других решений из-за своей расширяемости, способности одинаково отображаться на различных устройствах, масштабируемости, а также простоте в поиске данного решения пользователями.

### **Архитектура приложения**

Для описания архитектуры приложения были использованы диаграммы UML и AIA. UML представляет собой графическое отображение модели системы или процесса при помощи стандартных символов и нотаций, определенных в универсальном языке моделирования. AIA-диаграмма, или *Alternatively Isolated Activity diagram*, является инструментом моделирования, используемым в области программирования и разработки программного обеспечения. Она помогает организовать и отобразить последовательность выполнения операций или функций в программе или системе. С их помощью была описана архитектура проекта, интеграция программных модулей, а также использование приложения пользователями.

Кроме того, в системе присутствует разделение работы с онлайн-сервисом на различные роли. Например, обычные пользователи могут находить расписание выбранного университета, указывая интересующий их университет, учебную группу, настраивая конкретную дату при необходимости, а также просматривать дополнительную информацию по конкретному занятию.

Администраторы, в свою очередь, имеют доступ не только к просмотру расписания, но и к настройке автоматического или ручного обновления расписания, изменению или созданию настроек университета, добавлению новых учебных групп, а также чтению информации об ошибках или обратной связи пользователей.

### **Варианты использования**

Для описания вариантов использования была разработана UML-диаграмма изображенная на рисунке 1, которая описывает взаимодействие между действующими лицами с определенными ролями и онлайн-сервисом.

Из диаграммы UML видно, что как обычные пользователи, так и администраторы могут выполнять определенные действия. Однако действия, связанные с обновлением расписания, созданием расписания и получением обратной связи от пользователей, доступны лишь администраторам онлайн-сервиса.

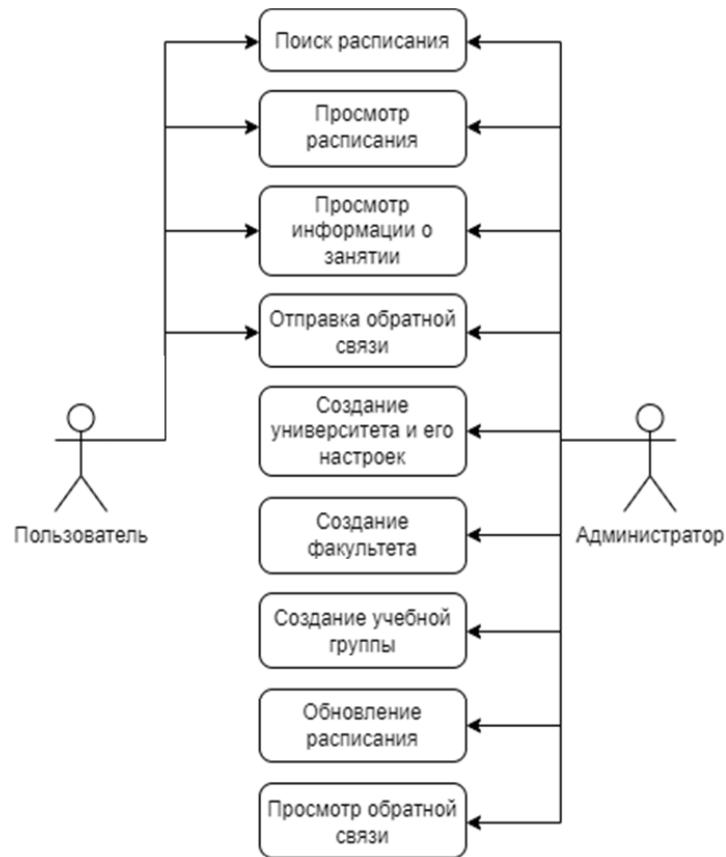


Рис. 1. Диаграмма вариантов использования

### АИА-диаграмма

Разрабатываемый проект представляет собой веб-приложение с архитектурой клиент-сервер, где блок преобразования расписания в требуемый формат данных для последующего сохранения в базе данных вынесен в отдельный сервис. Он связан с серверной частью посредством протокола HTTP/HTTPS через REST API.

REST представляет собой архитектурный стиль взаимодействия компонентов распределенного приложения в сети. Данный стиль определяет правила для организации серверного приложения, обеспечивающие удобный обмен данными между системами и возможность масштабирования приложения.

Для быстрого просмотра информации о работе приложения, его статуса и последних ошибок была разработана специализированная библиотека, которая отправляет служебную информацию на другое серверное приложение через HTTP для хранения, выборки и отправки в телеграмм администраторам системы через бота. Эта библиотека требует лишь настройки подключения к серверу, параметров безопасности, настройки для расширения предоставления служебной информации о работе модуля и всех его уровней (по желанию), а также наименования модуля, которое используется для фильтрации в телеграмм-боте.

Поскольку проект состоит из нескольких программных модулей, связанных между собой, была создана АИА-диаграмма для визуализации последовательности операций, управления потоками данных и отображения переходов от одной активности к другой. АИА-диаграмма представлена на рисунке 2.



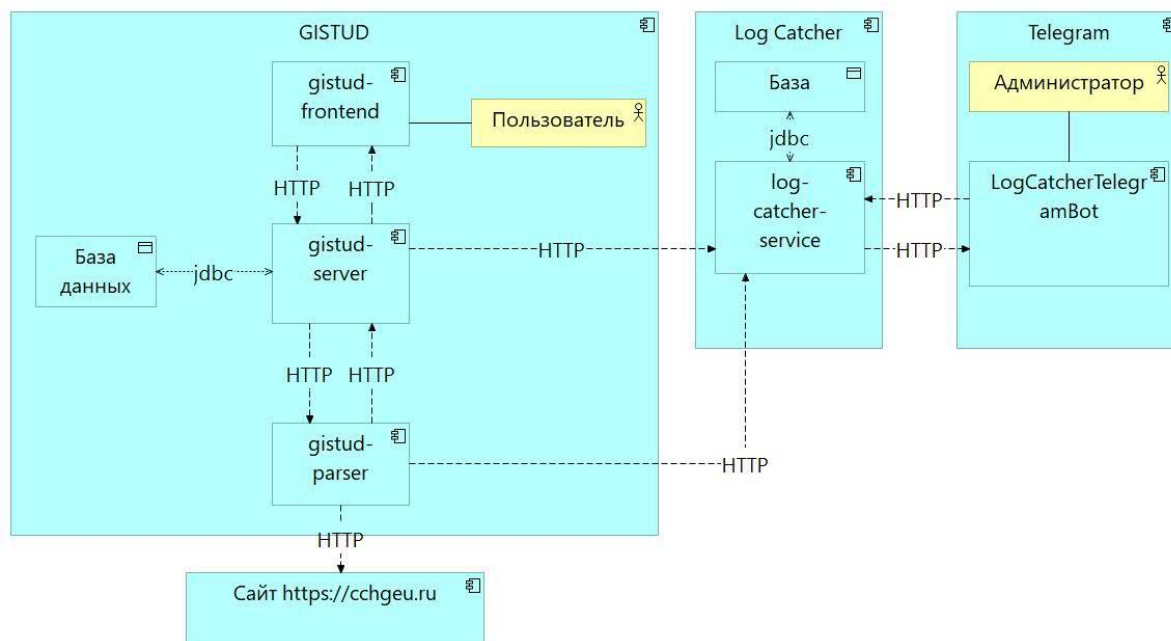


Рис. 2. AIA-диаграмма

Как видно на рисунке 2, модуль `gistud-server` при помощи JDBC-протокола обращается к базе данных. В основной базе данных сервера хранится информация об учебном расписании, учебных группах, университетах, типах занятий, аудиториях, задачах на автоматическое обновление расписания, а также обратной связью пользователя.

### База данных

В качестве базы данных была выбрана PostgreSQL. PostgreSQL - это реляционная база данных с открытым исходным кодом, обеспечивающая ряд преимуществ:

1) надежность и целостность данных: PostgreSQL гарантирует надежность данных через использование транзакционной модели, обеспечивая целостность и защиту от потерь или повреждения данных;

2) масштабируемость: База данных PostgreSQL позволяет горизонтальное и вертикальное масштабирование, что делает возможным добавление дополнительных серверов и увеличение ресурсов на текущих серверах;

3) расширяемость: PostgreSQL предлагает широкие возможности для расширения функциональности базы данных, включая создание пользовательских типов данных, функций, операторов, агрегатных функций и использование различных языков программирования для создания расширений;

4) поддержка стандартов: PostgreSQL стремится к полной совместимости с SQL-стандартами, что обеспечивает переносимость приложений и упрощает работу с другими базами данных;

5) расширенный набор функций: PostgreSQL предоставляет богатый набор встроенных функций и возможностей, включая поддержку географических данных, полнотекстового поиска, обработки JSON и XML, а также множество других расширений;

6) конкурентоспособная производительность: PostgreSQL обладает высокой производительностью и может эффективно обрабатывать большие объемы данных благодаря использованию различных оптимизаций [1].

Учитывая, что онлайн-сервис нацелен на несколько университетов и будет использоваться ежедневно, использование высокопроизводительной базы данных, такой как PostgreSQL, было обоснованным выбором.

Структура разработанной базы данных изображена на рисунке 3.

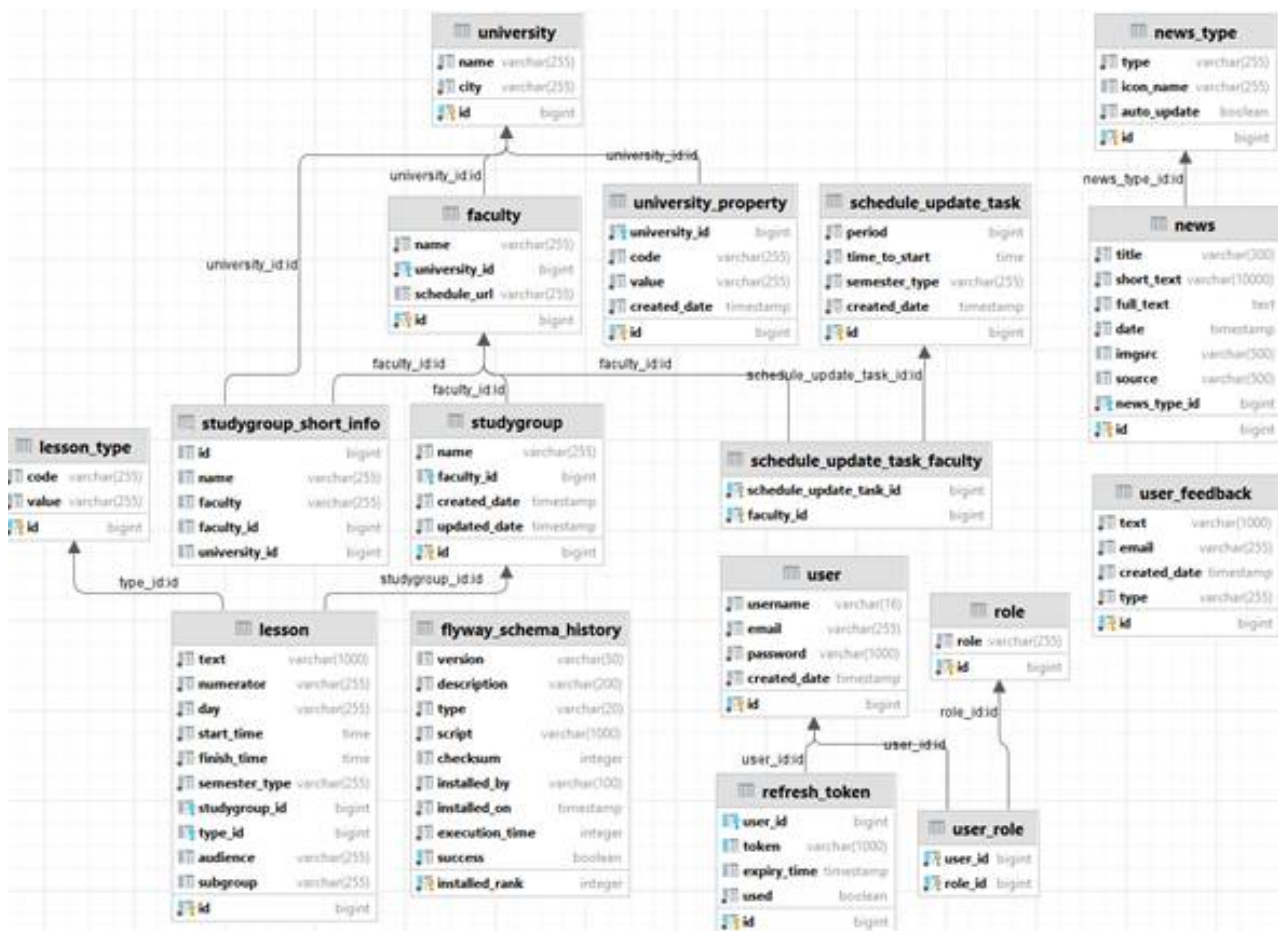


Рис. 3. Структура базы данных

### Серверная часть приложения

Серверная часть проекта представляет собой микросервисную архитектуру, в которой определенная функциональность выносится в отдельные модули, связанные между собой при помощи различных протоколов обмена, таких как REST, SOAP, AMQ и другие [2]. Этот подход помогает в масштабировании приложения, оптимизации разработки и экономии ресурсов сервера.

В приложении были реализованы следующие микросервисы:

- gistud-p2p, в котором реализованы основные действия обработки и группировки расписания [3];
- gistud-server, отвечающим за многопоточное асинхронное планирование задач на автоматическое обновление расписания, а также реализующим методы для организации работы с пользователем и с базой данных [4].

Пример работы пользователя с расписанием изображен на диаграмме последовательности на рисунке 4.

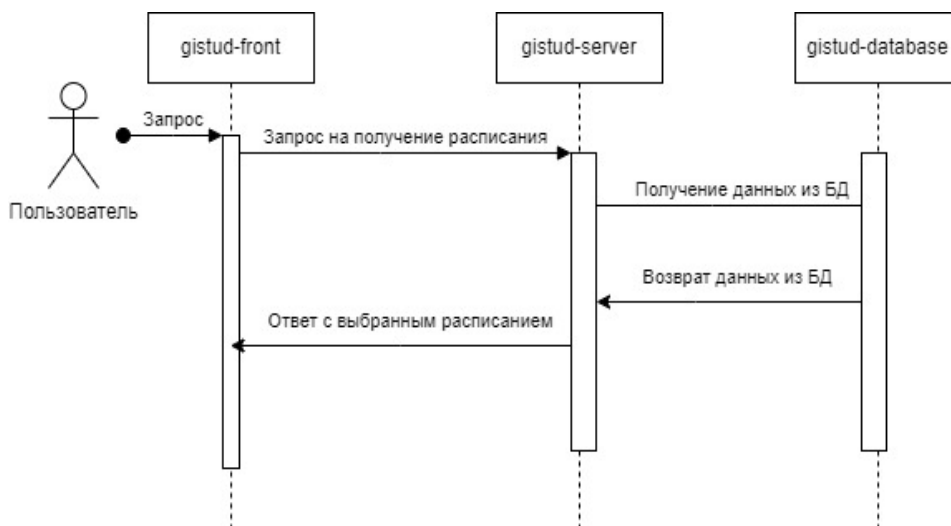


Рис. 4. Диаграмма последовательности получения расписания пользователем

### Клиентская часть приложения

Для реализации клиентской части был выбран фреймворк Vue.js как основной инструмент. Vue.js представляет собой JavaScript фреймворк, ориентированный на создание веб-интерфейсов с применением паттерна архитектуры MVVM (Model-View-ViewModel).

Кроме того, данный фреймворк предоставляет значительное количество готовых компонентов, CSS-стилей/классов, собственных директив и хелперов, которые могут быть использованы для создания более привлекательного и отзывчивого пользовательского интерфейса.

Клиентская часть разработана таким образом, чтобы приложение можно было использовать как на мобильных устройствах, так и на компьютерах. Пример запуска приложения с телефона и отображения на нем расписания приведен на рисунке 5.

Разработанное приложение внедрено и используется в Воронежском государственном техническом университете.

Таким образом, разработана архитектура информационной системы, предназначенной для отображения расписания учебных занятий на примере Воронежского государственного технического университета. Реализована как серверная часть приложения, так и клиентская, позволяющая просматривать расписание как с мобильных, так и со стационарных устройств. В настоящее время во 2 корпусе ВУЗа поставлен терминал с внедренным работающим приложением.

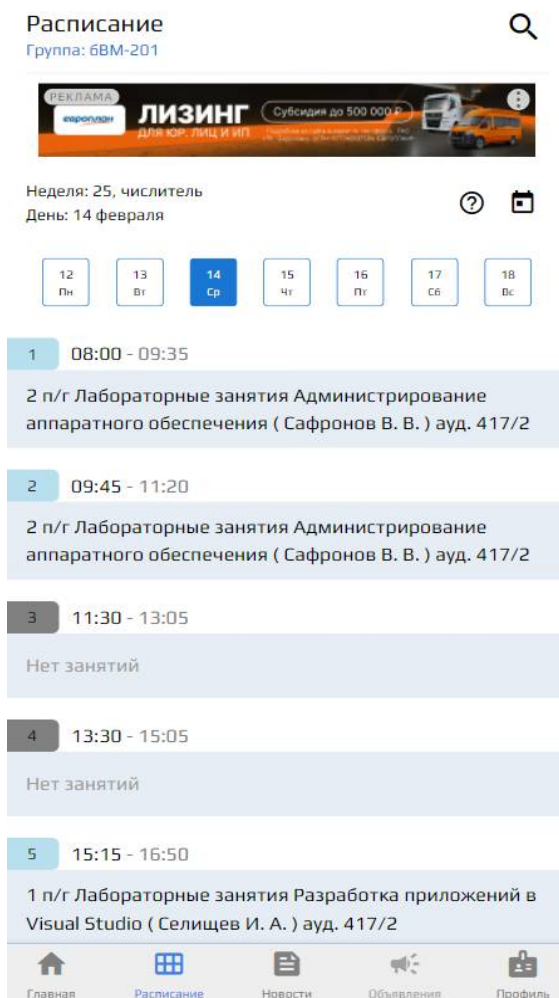


Рис. 5. Пример функционирования приложения на мобильном устройстве

### Библиографический список

1. Файли К. SQL/К. Файли: Пер. с англ. – М.: ДМК Пресс. – 456 с.
2. Козмина, Юлиана, Харроп, Роб, Шефер, Крис, Хо, Кларенс. K59 Spring 5 для профессионалов. : Пер. с англ. – СПб. : ООО "Диалектика", 2019. – 1120 с.
3. Хорстманн К. Java, Библиотека профессионала, том 1. Основы. 11-е изд./ К.Хорстманн.: Пер. с англ. — СПб.: ООО "Диалектика", 2019. — 864 с.
4. Гетц Брайан, Пайерлс Тим, Блох Джошуа, Боубер Джозеф, Холмс Дэвид, Ли Даг Д40 Java Concurrency на практике. — СПб.: Питер, 2020. — 464 с.

УДК 37.1174; ГРНТИ 14.14.15

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ОБУЧЕНИЯ КУРСАНТОВ

О.В. Чеблокова<sup>1</sup>, А.М. Евстигнеев<sup>1</sup>, С.Н. Беликова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Рязанское гвардейское высшее воздушно-десантное командное училище имени генерала армии В.Ф. Маргелова, Российская Федерация, Рязань, cheblokova63@eandex.ru

<sup>2</sup>Московский политехнический университет, Российская Федерация, Рязань, belikova.svetlana2010@eandex.ru

*Аннотация.* Данная статья посвящена уточнению теоретических положений и выработки практических рекомендаций по совершенствованию системы подготовки курсантов военных училищ к управлению подразделениями, приведения ее в соответствие с условиями преобразования военного образования, используя информационные технологии.

*Ключевые слова:* информационные технологии, повышение качества обучения, уровни знания, электронный паспорт военнослужащего.

## THE USE OF INFORMATION TECHNOLOGY TO IMPROVE THE QUALITY OF TRAINING FOR CADETS

O.V. Cheblokova<sup>1</sup>, A.M. Evstigneev<sup>1</sup>, S.N. Belikova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ryazan Guards Higher Airborne Command School named after Army General V.F. Margelov, Russian Federation, Ryazan, cheblokova63@eandex.ru

<sup>2</sup>Moscow Polytechnic University, Ryazan, Russian Federation, belikova.svetlana2010@eandex.ru

*The summary.* This article is devoted to clarifying theoretical provisions and developing practical recommendations for improving the system of training cadets of military schools to manage units in peacetime, bringing it in line with the conditions of transformation of military education.

The specifics of the content of powers, the principle of delegation and responsibility in the field of military administration were also considered.

*Keywords:* information technology, improving the quality of education, knowledge levels, electronic passport of a serviceman .

Высокая степень укомплектованности хорошо обученным и подготовленным офицерским составом является одним из принципиальных требований, определяющим параметры военного строительства. Сложный и изменчивый характер современной служебно-боевой деятельности, использование в ней информационных технологий, зависимость результата военных действий от содержания и качества боевой подготовки в мирное время, рост объема необходимой военной информации и уменьшение сроков на ее восприятие увеличивают потребность в дальнейшем совершенствовании системы военно-профессиональной подготовки курсантов высших военных учебных заведений.

Несмотря на существенные успехи в реформировании Вооруженных сил Российской Федерации органами военного управления различных уровней отмечается слабость военно-профессиональных качеств молодых офицеров в вопросах организации и всестороннего обеспечения боевой подготовки и повседневной деятельности подразделения.

В соответствии с квалификационными требованиями к военно-профессиональной подготовке выпускников военных вузов одним из немаловажных условий компетентности будущих офицеров является владение информационными технологиями в сфере их профессиональной деятельности для решения задач военной направленности.

Таким образом, выявленные обстоятельства требуют уточнения теоретических положений и выработки практических рекомендаций по совершенствованию системы подготовки курсантов военных училищ к управлению подразделениями в мирное время, приведения ее в соответствие с условиями преобразования военного образования.

Основными недостатками традиционного обучения в военном училище являются:

- один преподаватель и много обучаемых с разной степенью подготовки и различными способностями. Следовательно, преподаватель поставлен перед необходимостью ориентироваться на несуществующего «усредненного» обучаемого, а не на конкретного курсанта в аудитории;

- контроль обратной связи усвоения учебной информации обучаемыми преподавателем носит не постоянный характер (время от времени, со значительными перерывами, информация поступает с большим опозданием, в недостаточном объеме) и производится лишь при проведении зачетов, текущего и итогового контроля. Преподаватель не знает степень усвоения материала обучаемыми в каждый момент времени и поэтому не может оперативно корректировать свои педагогические действия;

- ограничение преподавателя в значительной степени возможности поддерживать обучаемых в состоянии постоянной активной познавательной деятельности, его свобода активировать по своему усмотрению каналы прямой и обратной связи сильно ограничены. Обучение – это двухсторонний процесс, эффективность обучения значительно снижается если одна сторона пассивна;

- частые срывы реализации задач самостоятельной работы и ее осуществления. Причинами этого являются отсутствие: материально-технической базы и помещений для выполнения курсантами конкретных заданий в рамках образовательного процесса; помещений для выполнения курсантами конкретных заданий в рамках образовательного процесса; обоснованности; содержания заданий, выдаваемых для самостоятельного изучения; сопровождения преподавателями всех этапов выполнения самостоятельной работы, текущий и конечный контроль ее результатов; необходимого фонда информации для самостоятельной работы обучающихся и возможности работы с ним в аудиторное и внеаудиторное время.

Данные недостатки могут быть устранены при использовании информационных технологий обучения, и стать важнейшим фактором повышения качества обучения курсантов.

Говоря об информационных технологиях обучения имеем ввиду использование компьютера как средства управления учебной деятельностью.

Необходимыми условиями для повышения качества обучения курсантов с использованием информационных технологий обучения к управлению подразделениями в мирное время являются:

- наличие методик использования информационных технологий, соответствующих образцовому обучению;

- наличие и использование в организации образовательного процесса всех возможностей компьютерных и в частности мультимедийных образовательных технологий;

- обеспечение процесса планирования и управления качеством подготовки современными ЭВМ и программным обеспечением;

- наличие и высокий уровень информационной культуры не только у обучаемых, но и у всех преподавателей высшей военной школы;

- обеспечение необходимого уровня информатизации проведения занятий;

- обеспечение необходимого уровня технизации и информатизации мест проведения занятий;

- обеспеченность у обучающихся доступа к объему учебной информации;
- наличие и обеспечение реализации в учебном процессе методических разработок на основе информатизированных компьютерных технологий [1].

Для повышения обучения курсантов с использованием компьютерных технологий необходимо создание адаптивной модели действий педагога, в котором будут учитываться цели, методы, результаты обучения. Развитие в настоящее время информационных технологий обучения должно подчиняться общим дидактическим закономерностям процесса обучения-познания. При этом стоит помнить, что обучение нужно понимать как информационный процесс формирования знаний у обучающихся под управлением преподавателя. Знания должны выступать в качестве информации, способной генерировать в более новую информацию. Вопрос о понимании, что такое знания, является главной в задаче формализации целей информационных технологий обучения, а также в проблеме информатизации образования.

Существует несколько уровней знаний:

Первый уровень – умение решать типовые задачи, который заключается в способности построить вычислительную схему решения типовой задачи, отвечая на вопрос: как решить?

Второй уровень – умение решать прикладные задачи, который заключается в способности наложить прикладные задачи на типовые, исходя из целей исходной задачи.

Третий уровень – умение интегрировать межпредметные связи, который заключается в способности использовать для решения прикладных задач знания различных предметов [2].

Достижение перечисленных уровней знания связано с привлечением тех или иных технологий обучения и выражается в формировании высокой степени устойчивого умения, возникновения в стереотипах в действиях, приводящих к получению желаемого результата – навыка.

Наличие программ сбора хранения информации в ходе обучения следует считать важнейшим преимуществом проведения занятий с помощью информационных технологий обучения. Эта информация используется как с целью непрерывного контроля процесса обучения, быстрого выявления хорошо или слабо успевающих, так и в интересах дальнейшего изучения для совершенствования содержания занятий.

Выделение контроля в относительно самостоятельную функцию управления носит условный характер. В действительности он органически связан со всеми другими функциями управления. Контроль на всех стадиях работы обучаемого при использовании информационных технологий обучения выявляет улучшения прогнозирования, позволяет корректировать дидактические возможности компьютерной обучающей программы.

Сам процесс контроля индивидуализируется и становится массовым, фронтальным, оперативным, объективным и экономичным. Контроль есть не только способ оценки достигнутых связей в процессе обучения, что является необходимым условием достижения цели в информационных технологиях обучения. обратные связи адаптируют процесс обучения к уровню освоения учебного материала.

Поэтому актуальной проблемой является разработка методов и алгоритмов принятия решения по управлению адаптации обучаемых в условиях использования современных информационных технологий обучения.

Необходимо постоянно помнить, что управлять – это не подавлять, не навязывать процессу ход, противоречащий его природе, а наоборот, максимально учитывать природу процесса, согласовывать каждое воздействие на процесс с его логикой [1].

Движение обучаемого по этапам технологического процесса не является только поступательным. При обнаружении пробелов в овладении материалом, алгоритм выработки учебных заданий возвращает обучаемого к соответствующим модулям курса.

Анализ используемых информационных технологий обучения позволяет выделить соответствующие режимы управления обучаемыми при компьютерном обучении:

- непосредственное управление: компьютер предъявляет обучаемым учебную задачу и определяет характер помощи;

- опосредованное управление: компьютер не предъявляет учебную задачу обучаемым, а ставит проблему, которую те должны оформить в виде учебной задачи при этом допускается множество решений;

- динамическое управление: предъявленная задача обучаемому решается совместно с компьютером при котором характер и меру помощи определяют как обучаемый, так и компьютер;

- управление, при котором компьютер играет роль средства учебной деятельности обучаемых, а учебную задачу, характер и вид помощи определяет сам обучаемый. В случае затруднений обучаемый может передать управление компьютеру.

В настоящее время можно с уверенностью заявить, что развитие информационных технологий обучения совершенствуются постоянно, но не в полном объеме происходит изучение этого комплекса.

Ярким примером реализации информационных технологий в Вооруженных Силах Российской Федерации является электронный паспорт военнослужащего.

Электронный паспорт военнослужащего является информационной системой, которая представляет собой совокупность документов и сведений в электронной форме. Он ведется психологом воинской части.

Участниками электронного паспорта военнослужащего могут быть все военнослужащие воинской части (также женский персонал), а также и другие лица (гражданский персонал), но с учетом ограничений, определенных требованиями руководящих документов Министерства обороны Российской Федерации.

Одним из элементов, включенным в электронный паспорт военнослужащего, может быть психологический портрет военнослужащего, который может очень много рассказать о способностях, возможностях и наклонностях военнослужащего. Это может помочь психологам не только активизировать положительные стороны, но и предотвратить отрицательные последствия.

Если внедрить такой паспорт в военном вузе, то можно на основе его данных повысить результативность образовательного процесса в несколько раз активизируя потенциал каждого из обучаемых, а зная психологический портрет курсанта и его изменение на протяжении всего курса обучения еще и предотвратить многие конфликты, возникающие в воинском коллективе.

### Библиографический список

1. Виленский, В.Я., Образцов, П.И., Уман, А.П. Технологии профессионально-ориентированного обучения в высшей школе: учебное пособие [Текст] / под ред. В.А. Сластенина – М.: Издательство Юрайт, 2017. – С. 80–82.
2. Захарова, И.Г. Информационные технологии в образовании: учебное пособие [Текст] / И.Г. Захарова. – 6-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2010.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ИНФОРМАЦИЯ О VII МЕЖДУНАРОДНОМ ФОРУМЕ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ» СТНО-2024»</b> .....	3
<b>МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ»</b> .....	6
<b>Секция «МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ»</b> .....	6
<b>Новиков А.И.</b> Алгоритм формирования 3D-изображений по последовательности пар стереоизображений...	6
<b>Пронькин А.В.</b> Фильтрация периодического шума с использованием детектора границ.....	11
<b>Бухенский К.В., Дюбуа А.Б., Конюхов А.Н.</b> Исследование нечетких чисел LR-типа с нечеткими спредами LR-типа.....	17
<b>Ершова А.С.</b> Прогноз регрессионных зависимостей по данным ЦФО.....	22
<b>Нелюхин С.А.</b> Компьютерный метод поиска псевдорешений несовместных систем линейных алгебраических уравнений на основе метода наименьших квадратов.....	28
<b>Карпеев Н.С.</b> Построение решения задачи Коши комбинированной модели экономического роста и делового цикла в некоторых случаях.....	33
<b>Толкачева И.В.</b> Панельный анализ региональных различий одной математической модели научного потенциала регионов Центрального федерального округа.....	39
<b>Лискина Е.Ю.</b> Компьютерное моделирование траекторий систем дифференциальных уравнений с нелинейностью четной степени.....	43
<b>Абрамов В.В.</b> Об одном признаке устойчивости нулевого решения периодической системы обыкновенных дифференциальных уравнений.....	47
<b>Купцов И.М.</b> Применение теории больших решений обыкновенных дифференциальных уравнений к моделированию динамики инфекционных заболеваний и распространения информации..	54
<b>Юдин Д.В., Абрамов В.В.</b> Об одной модели односекторной экономики с ограниченными возможностями использования производственных факторов.....	58
<b>Иванов А.И., Коненков Н.В.</b> Контур пропускания цифровой ионной ловушки с асимметричной формой импульсного питания.....	63
<b>Козлов Г.Е.</b> О применении формулы Ньютона-Котеса.....	69



<b>Зайкин К.В., Конюхов А.Н.</b> Имитационное моделирование управления светофорным циклом «транспорт – пешеходы» на основе нечеткой логики.....	72
<b>Ципоркова К.А., Лукьянова Г.С.</b> Косвенные измерения для сглаживания многомерного случайного сигнала.....	76
<b>Бугров П.В.</b> Фокусировка ионов в буферном газе в квадрупольном фильтре масс с импульсной и синусоидальной формами питающих напряжений.....	81
<b>Секция «ОБРАБОТКА ДАННЫХ, ИЗОБРАЖЕНИЙ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ».....</b>	<b>85</b>
<b>Жабин В.С., Муртазов А.К.</b> Модели естественного загрязнения околоземного пространства как основа информационной системы его состояния.....	85
<b>Гондин Д.А.</b> Анализ производительности алгоритма БПФ на CPU и GPU.....	95
<b>Бехтин Ю.С., Ильин А.А.</b> Программное обеспечение для симуляции сканирования точечного источника излучения многоэлементным фотоприемником.....	100
<b>Астапов В.С., Бабаян П.В.</b> Применение технического зрения для оценки параметров детали.....	102
<b>Соловьев Д.С.</b> Структурно-параметрический синтез интеллектуальной системы управления на основе ассоциативной памяти в условиях неопределенности.....	103
<b>Аксенов А.М.</b> Минимизация количества ресурсов ПЛИС при организации блочной памяти для задачи обработки цифровых сигналов.....	110
<b>Костров В.В., Ракитин А.В.</b> Автоматическое обнаружение объектов на изображении при наличии нестационарного фона.....	114
<b>Молчанова Т.И., Никитин А.М.</b> Разработка и анализ модели нелинейного объекта для компьютерного моделирования автоматизированной системы управления виброиспытаниями.....	123
<b>Выставкин К.О.</b> Автоматизированная система тепловизионного поиска утечек на теплосетях.....	128
<b>Соколов Н.А.</b> Коррекция зонных искажений с использованием нейросети U-Net.....	132
<b>Бурковский В.Л., Сердечная Е.А.</b> Применение нейросетевых технологий для прогноза спроса в организационных системах потребительского рынка.....	138
<b>Карпухин Д.Н., Бурковский В.Л., Шевченко Д.С.</b> Использование GPGPU-вычислений для сокращения времени, необходимого на обучение искусственной нейронной сети.....	140

<b>Корниенко М.Д.</b> Линеаризуемые системы с неявным планированием траектории и обратной связью.....	144
<b>Чернов В.Г.</b> Решение нечеткой биматричной игры.....	148
<b>Кузнецов В.П.</b> Комплексная нейронная сеть для построения инверсной модели объекта.....	151
<b>Секция «ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ».....</b>	158
<b>Дубинин В.Н., Ручкин М.А., Дубинин А.В., Климкина Л.П.</b> Использование языка SPARQL в реализации графодинамической модели для поиска кратчайших путей в графе.....	158
<b>Карасев В.В., Михеев А.А.</b> Передача данных в информационно-управляющей системе для ресурсных испытаний вращающихся узлов и механизмов.....	163
<b>Баранов А.Ю., Маркин А.В.</b> Исследование процессов интеллектуальной и функциональной поддержки пользователей информационных систем.....	168
<b>Миронов Вал.В.</b> Индекс респектабельности – новый наукометрический индекс коллективных научных изданий.....	178
<b>Сурков А.А.</b> Анализ программируемых логических контроллеров для разработки системы управления оборудованием предприятий.....	187
<b>Гульняшкин Г.В.</b> Разработка информационной системы для формирования карт на основе данных дистанционного зондирования земли.....	191
<b>Шерстюк А.С.</b> Творческий симбиоз человека и нейронной сети при создании графических объектов.....	196
<b>Маркин А.В., Юркова В.И.</b> Разработка подсистемы анализа платежной дисциплины абонентов предприятий ЖКХ.....	199
<b>Федотов Е.М.</b> Применение нейросетевой языковой модели для генерации ответов чат-бота при обучении SQL.....	203
<b>Козлова Е.А.</b> Внедрение нейронных сетей в систему PERT.....	210
<b>Романов А.Р.</b> Сравнительный анализ существующих алгоритмов для реализации основных этапов обучения управлению беспилотными летательными аппаратами.....	213
<b>Краснов К.А.</b> Технико-экономическое обоснование разработки информационно-аналитической системы коммунального биллинга.....	216

<b>Дорин И.Н.</b> Принципы организации предприятия по доставке продуктов в поселении сельского типа.....	222
<b>Бубликов Д.И., Маркин А.В.</b> Алгоритм поиска запросов, несовместимых с целевой СУБД, при миграции базы данных .....	226
<b>Михайлик В.К.</b> Особенности конвертации данных в продуктах 1С.....	233
<b>Кочетков А.В.</b> Особенности применения ТРИЗ в решении изобретательских задач информационно- технологического характера.....	236
<b>Азаренко С.А., Исаев Р.А.</b> Идентификация нечетких когнитивных карт с использованием эволюционных вычислений.....	240
<b>Гаушко А.М.</b> Применение спутниковой навигации для решения задач позиционирования.....	246
<b>Пшибло М.Ю., Исаев Р.А.</b> Оптимизация назначения заданий для складских роботов.....	248
<b>Лаврин А.И., Лобанов П.Г., Шипилова А.Д., Шабунин Д.А., Кузнецов К.Д.</b> Технология виртуальной реальности на пути к здоровому образу жизни.....	255
<b>Сащенко Д.Л.</b> Архитектура информационной системы для просмотра расписания учебных занятий.....	258
<b>Чемлокова О.В., Евстигнеев А.М., Беликова С.Н.</b> Использование информационных технологий для повышения качества обучения курсантов.....	264

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ

Научное издание

В 10 томах

Том 5

Под общей редакцией О.В. Миловзорова.

Подписано в печать 15.06.24. Формат 60x84 1/8.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

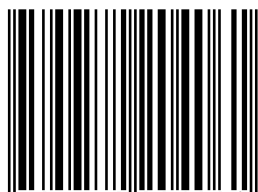
Гарнитура «Times New Roman».

Усл. печ. л..

Тираж 100 экз. Заказ №.

Рязанский государственный радиотехнический университет,  
Редакционно-издательский центр РГРТУ,  
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

ISBN 978-5-7722-0406-1



9 785772 204061 >