

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-2025

**VIII МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-
ТЕХНИЧЕСКИЙ ФОРУМ**

Сборник трудов

Том 5

Рязань
2025

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

С 568

Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2025 [текст]: сб. тр. VIII международ. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.5./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2025.

ISBN 978-5-7722-0422-1

Т.5: – 284 с.,: ил.

ISBN 978-5-7722-0427-6

Сборник включает труды участников VIII Международного научно-технического форума «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2025.

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 978-5-7722-0422-1

ISBN 978-5-7722-0427-6

© Рязанский государственный
радиотехнический университет, 2025

ИНФОРМАЦИЯ О VIII МЕЖДУНАРОДНОМ ФОРУМЕ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ» СТНО-2025

VIII Международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2025 состоялся 04.03.2025-06.03.2025 в г. Рязань в Рязанском государственном радиотехническом университете имени В.Ф. Уткина.

В рамках форума «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2025 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, математическое моделирование 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 и модели в научных исследованиях и прикладных

проблемах;

- 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;
- Финансы и налоги;

«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;
- Особенности военного образования на современном этапе.

Организационный комитет Форума:

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

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

Мионов Вал.В., профессор кафедры высшей математики, д.ф.-м.н., проф. – 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.;

Журавлёва Т.А., доцент кафедры экономической безопасности, анализа и учета, к.э.н., доц.;

Киселёва О.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.;

Кошелёв 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.;

Куприянова М.Н., доцент кафедры экономики, менеджмента и организации производства, к.э.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;

Мионов 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.;

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.;

Саблина В.А., доцент кафедры электронных вычислительных машин, к.т.н., доц.;

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

Семенов А.Р., доцент кафедры химической технологии, к.ф.-м.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;

Торженова Т.В. доцент кафедры экономической безопасности, анализа и учета, к.э.н., доц.;

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;

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.;

Шурчкова И.Б., доцент кафедры экономической безопасности, анализа и учета, к.э.н., доц.;

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

**МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ.
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ»**

**СЕКЦИЯ «МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И МОДЕЛИ В НАУЧНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЯХ И ПРАКТИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМАХ»**

УДК 510.644; ГРНТИ 27.03.33

**МОДЕЛЬ НЕЧЕТКОЙ РЕГРЕССИИ НА ОСНОВЕ ЧИСЕЛ LR-ТИПА
С НЕЧЕТКИМИ СПРЭДАМИ**

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

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

Аннотация. В статье рассматривается применение нечетких чисел с нечеткими спрэдами (НЧНС) LR-типа (упрощенный подкласс нечетких множеств типа 2 – Type-2 FSs) в качестве коэффициентов модели однофакторной полностью нечеткой регрессии (ОПНР). Регрессор и зависимая переменная – нечеткие числа в LR-представлении (подкласс нечетких множеств типа 1 – Type-1 FSs). Оценка параметров модели может осуществляться обыкновенным методом наименьших квадратов (МНК).

Ключевые слова: полностью нечеткая регрессия, нечеткое число LR-типа, нечеткий спред, $\alpha\beta\gamma$ -сечения.

**FUZZY REGRESSION MODEL BASED ON LR-TYPE NUMBERS
WITH 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*

The summary. This paper is focused on using LR-type fuzzy numbers with fuzzy spreads (one simplified subclass of Type-2 FSs) as coefficients of a fully fuzzy regression model with a single input. Input and output variables are represented as usual LR-type numbers (subclass of Type-1 FSs). The Ordinary Least Squares (OLS) may be used for model parameters estimation.

Keywords: fully fuzzy regression, LR-type fuzzy number, fuzzy spread, $\alpha\beta\gamma$ -cuts.

I. Математическая модель нечетких чисел с нечеткими спрэдами (НЧНС).

Известно [1], что нечеткие числа (НЧ) LR-типа образуют подкласс выпуклых нормальных нечетких множеств (НМ) первого типа (Type-1 НМ) с непрерывным ограниченным носителем и с функцией принадлежности (ФП) вида

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

где $m_1 \leq x \leq m_2$ – ядро НЧ; $ls > 0$ и $rs > 0$ – левый и правый спрэды НЧ;

запись $L(t), R(t) \in SF[0,1]$ означает, что функции $L(t), R(t)$ принадлежат классу функций формы (ФФ), что означает

$$F(t) \in SF[0,1] \stackrel{def}{\Leftrightarrow} \begin{cases} F(t): [0,1] \rightarrow [0,1], \\ F(t) \in C[0,1], \\ F(0) = 1, F(1) = 0, \\ F(t) \downarrow, 0 \leq t \leq 1. \end{cases} \quad (2)$$

Нечеткие множества второго типа (Туре-2 НМ) являются обобщением Туре-1 НМ, в том смысле, что степени принадлежности элементов последних – суть нечеткие множества, [2].

В работе [3] нами было предложено расширение чисел (1) путем фаззификации спрэдов с выходом на упрощенную разновидность Туре-2 НЧ, ФП которых

$$\tilde{u}(x, y, z) = \left[m_1, m_2, [m_{l_s}, l_{s_{l_s}}, r_{s_{l_s}}]_{L_{l_s}R_{l_s}}, [m_{r_s}, l_{s_{r_s}}, r_{s_{r_s}}]_{L_{r_s}R_{r_s}} \right]_{L_0R_0}(x, y, z), \quad (3)$$

где в квадратных скобках перечислены структурные параметры НЧНС. Для удобства восприятия параметры левого и правого нечетких спрэдов соответственно $[m_{l_s}, l_{s_{l_s}}, r_{s_{l_s}}]_{L_{l_s}R_{l_s}}$, $[m_{r_s}, l_{s_{r_s}}, r_{s_{r_s}}]_{L_{r_s}R_{r_s}}$ также заключены в квадратные скобки, причем, нечеткие спрэды могут быть либо знакоопределенными НЧ, либо НЧ неопределенного знака (носитель содержит нуль как внутреннюю точку). Так, запись $[m_{l_s}, l_{s_{l_s}}, r_{s_{l_s}}]_{L_{l_s}R_{l_s}}$ означает, что левый нечеткий спрэд – унимодальное НЧ с ядром m_{l_s} и четкими спрэдами $l_{s_{l_s}}$ (левым) и $r_{s_{l_s}}$ (правым) соответственно; функции формы левого нечеткого спрэда: L_{l_s} – левая, R_{l_s} – правая. В общем случае ФФ могут быть разными, однако чаще других используется линейная ФФ $F(t) = 1 - t$, ($0 \leq t \leq 1$), которая и будет использована во всех последующих выкладках.

НЧНС (3) можно дискретизировать с шагом $h=1/n$: $\alpha = 0, h, \dots, 1$, $\beta = 0, h, \dots, 1$ и так далее по всем переменным ($n+1$ уровень по каждой). Далее рассматриваем НЧНС в виде объединения $\alpha\beta\gamma$ -сечений, для удобства представленного в матричной форме:

$$\tilde{u} = \bigcup_{\alpha, \beta, \beta_1, \gamma_1, \gamma} \begin{pmatrix} DD_{\alpha, \beta} & DU_{\alpha, \beta_1} \\ UU_{\alpha, \gamma} & UD_{\alpha, \gamma_1} \end{pmatrix}; \quad 0 \leq \alpha, \beta, \beta_1, \gamma_1, \gamma \leq 1, \quad (4)$$

где по определению

$$\begin{cases} DD_{\alpha, \beta} = mu_1 - (m_{l_{su}} + r_{s_{l_{su}}} F^{-1}(\beta)) F^{-1}(\alpha), \\ DU_{\alpha, \beta_1} = mu_1 - (m_{l_{su}} - l_{s_{l_{su}}} F^{-1}(\beta_1)) F^{-1}(\alpha), \\ UD_{\alpha, \gamma_1} = mu_2 + (m_{r_{su}} - l_{s_{r_{su}}} F^{-1}(\gamma_1)) F^{-1}(\alpha), \\ UU_{\alpha, \gamma} = mu_2 + (m_{r_{su}} + r_{s_{r_{su}}} F^{-1}(\gamma)) F^{-1}(\alpha). \end{cases} \quad (5)$$

В (4, 5) аббревиатуры D (down) и U (up) означают нижнюю и верхнюю границы сечения НЧНС соответственно. Например, запись $DD_{\alpha, \beta}$ означает «нижне-нижнюю» границу сечения НЧНС: реализовано максимальное при данном β значение левого нечеткого спрэда и, далее, в этих условиях взято нижнее α -сечение полученного НЧ. При этом переменные $\alpha, \beta, \beta_1, \gamma_1, \gamma$, вообще говоря, независимы друг от друга.

Ранее было показано, что

$$DD_{\alpha, \beta} \leq DU_{\alpha, \beta_1} \leq UD_{\alpha, \gamma_1} \leq UU_{\alpha, \gamma}, \quad (6)$$

при любых $\alpha, \beta, \beta_1, \gamma_1, \gamma \in [0, 1]$ и выполнении условия $mu_1 - m_{lsu} + ls_{lsu} \leq mu_2 + m_{rsu} - ls_{rsu}$, [3].

II. Построение модели однофакторной полностью нечеткой регрессии (ОПНР) для НЧНС.

Рассмотрим выборку из N упорядоченных пар нечетких чисел $(\tilde{x}_j, \tilde{y}_j)$ и запишем эмпирическую модель ОПНР в виде

$$\tilde{y}_j = \tilde{a} \oplus \tilde{b} \odot \tilde{x}_j \oplus \tilde{e}_j, \quad (7)$$

где все величины (7) суть нечеткие числа: \tilde{x}_j – выборочные значения регрессора (НЧ первого типа), \tilde{y}_j – выборочные значения зависимой переменной (НЧ первого типа);

\tilde{a}, \tilde{b} – нечеткие эмпирические коэффициенты второго типа (НЧНС);

\oplus, \odot - операции сложения и умножения чисел в соответствии с принципом обобщения L.Zadeh, [1];

\tilde{e}_j – остатки регрессии (НЧ первого типа).

В силу выпуклости НЧ, операции можно осуществлять над $\alpha\beta\gamma$ -сечениями НЧНС в соответствии с правилами интервальной арифметики. В частности, для модели (7) опишем следующие операции.

а) Сложение двух НЧНС:

$$\left(\tilde{u} \oplus \tilde{u}' \right)_{\alpha, \beta, \beta_1, \gamma_1, \gamma} = \left(\tilde{u} \right)_{\alpha, \beta, \beta_1, \gamma_1, \gamma} + \left(\tilde{u}' \right)_{\alpha, \beta, \beta_1, \gamma_1, \gamma} = \begin{pmatrix} DD_{\alpha, \beta} + DD'_{\alpha, \beta} & DU_{\alpha, \beta_1} + DU'_{\alpha, \beta_1} \\ UU_{\alpha, \gamma} + UU'_{\alpha, \gamma} & UD_{\alpha, \gamma_1} + UD'_{\alpha, \gamma_1} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

б) Умножение НЧНС произвольное число $\lambda \in \mathbb{R}$:

$$\left(\tilde{u} \otimes \chi \{ \lambda \} \right)_{\alpha, \beta, \beta_1, \gamma_1, \gamma} = \lambda \cdot \begin{pmatrix} \theta(\lambda) & \theta(-\lambda) \\ \theta(-\lambda) & \theta(\lambda) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} DD_{\alpha, \beta} & DU_{\alpha, \beta_1} \\ UU_{\alpha, \gamma} & UD_{\alpha, \gamma_1} \end{pmatrix}. \quad (9)$$

где $\chi \{ \lambda \}$ – нечеткий синглтон (представление действительного числа как элемента множества НЧ, например в виде $\chi \{ \lambda \} = tr [\lambda, \lambda, \lambda]$ – треугольное число с нулевыми спредами); $\theta(\lambda)$ – функция Хэвисайда, причем $\theta(0) = 0$.

в) Умножение НЧНС \tilde{u}' на НЧ первого типа \tilde{u} , заданное объединением своих α -сечений $\bigcup_{\alpha} (\tilde{u})_{\alpha} = \bigcup_{\alpha} (\underline{u}_{\alpha} \quad \bar{u}_{\alpha})^T$; $\alpha = 0, h, \dots, 1$, где \underline{u}_{α} – нижняя, а \bar{u}_{α} – верхняя граница α -сечения НЧ \tilde{u} .

Сформируем вспомогательные матрицы 2x2:

$$\begin{aligned} MD(\alpha, \beta, \beta_1, \gamma_1, \gamma) &= \left(\tilde{u}' \otimes \chi \{ \underline{u}_{\alpha} \} \right)_{\alpha, \beta, \beta_1, \gamma_1, \gamma}, \\ MU(\alpha, \beta, \beta_1, \gamma_1, \gamma) &= \left(\tilde{u}' \otimes \chi \{ \bar{u}_{\alpha} \} \right)_{\alpha, \beta, \beta_1, \gamma_1, \gamma}. \end{aligned} \quad (10)$$

Тогда

$$\left(\tilde{u} \odot \tilde{u}' \right)_{\alpha, \beta, \beta_1, \gamma_1, \gamma} = \begin{pmatrix} \min \{ MD_{1,1}, MU_{1,1} \} & \min \{ MD_{1,2}, MU_{1,2} \} \\ \max \{ MD_{2,1}, MU_{2,1} \} & \max \{ MD_{2,2}, MU_{2,2} \} \end{pmatrix}. \quad (11)$$

г) Дефаззификация НЧНС до НЧ.

Самое простое решение – среднее арифметическое усреднение по всем уровням $\beta, \beta_1, \gamma_1, \gamma$:

$$(\tilde{u})_\alpha = (\underline{u}_\alpha \quad \overline{u}_\alpha)^T = Dfz(\tilde{u})_\alpha = \frac{1}{n+1} \begin{pmatrix} \sum_{\beta} DD_{\alpha,\beta} & \sum_{\beta_1} DU_{\alpha,\beta_1} \\ \sum_{\gamma} UU_{\alpha,\gamma} & \sum_{\gamma_1} UD_{\alpha,\gamma_1} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1/2 \\ 1/2 \end{pmatrix}, \alpha = 0, h, \dots, 1. \quad (12)$$

Вопрос о процедуре дефаззификации остается открытым. В частности можно использовать весовые коэффициенты, отражающие различный вклад сечений в формирование результата. В таком случае эти коэффициенты также будут подлежать оптимизации.

III. Оценка параметров НЧНС в ОПНР.

Производится обыкновенным методом наименьших квадратов (МНК).

Целевая функция (Z) – средняя сумма квадратов остатков по всем наблюдениям $j = \overline{1, N}$:

$$Z(\mathbf{Pa}, \mathbf{Pb}) = \sum_{j=1}^N \left[\sum_{\alpha} (\tilde{e}_j)_{\alpha}^T \cdot (\tilde{e}_j)_{\alpha} \right] \rightarrow \min, \quad (13)$$

где

$$(\tilde{e}_j)_{\alpha} = (\underline{e}_{j,\alpha} \quad \overline{e}_{j,\alpha})^T = (\tilde{y}_j)_{\alpha} - Dfz(\tilde{a}(\mathbf{Pa}) \oplus \tilde{b}(\mathbf{Pb}) \odot \tilde{x}_j)_{\alpha} \quad (14)$$

\mathbf{Pa}, \mathbf{Pb} – векторы оцениваемых структурных параметров НЧНС – коэффициентов регрессионной модели:

$$\begin{aligned} \mathbf{Pa} &= (ma_1, ma_2, m_{lsa}, ls_{lsa}, rs_{lsa}, m_{rsa}, ls_{rsa}, rs_{rsa})^T, \\ \mathbf{Pb} &= (mb_1, mb_2, m_{lsb}, ls_{lsb}, rs_{lsb}, m_{rsb}, ls_{rsb}, rs_{rsb})^T. \end{aligned} \quad (15)$$

В качестве ограничений модели выступают лишь естественные ограничения:

$$\begin{cases} m_{lsa}, ls_{lsa}, rs_{lsa}, m_{rsa}, ls_{rsa}, rs_{rsa} \geq 0; \\ m_{lsb}, ls_{lsb}, rs_{lsb}, m_{rsb}, ls_{rsb}, rs_{rsb} \geq 0. \end{cases} \quad (16)$$

Таким образом задача (13-16) – оптимизационная задача с нелинейной целевой функцией и с линейными естественными ограничениями.

В качестве показателя адекватности расчетных данных фактическим можно использовать среднюю квадратическую ошибку аппроксимации ($RMSE$):

$$RMSE = \frac{1}{\sqrt{N(n+1)}} \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^N \left(\left(\sum_{\alpha} (\underline{e}_{j,\alpha} \quad \overline{e}_{j,\alpha})^T \cdot (\underline{e}_{j,\alpha} \quad \overline{e}_{j,\alpha}) \right) - (\underline{e}_{j,1})^2 \right)}. \quad (17)$$

В случае линейной ФФ целесообразно рассчитывать $RMSE$ только на множестве значений $\alpha = 0, 1$.

То есть (17) примет вид

$$RMSE_1 = \frac{1}{\sqrt{3N}} \cdot \sqrt{\sum_{j=1}^N \left(\left(\sum_{\alpha=0,1} (\underline{e}_{j,\alpha} \quad \overline{e}_{j,\alpha})^T \cdot (\underline{e}_{j,\alpha} \quad \overline{e}_{j,\alpha}) \right) - (\underline{e}_{j,1})^2 \right)}. \quad (18)$$

Пример. Оценка параметров ОПНР по исходным данным в MathCad (рис. 1).

$$X_{\text{par}} := \begin{pmatrix} 2 & 3.5 & 5.5 & 7 & 8.5 & 10.5 & 11 & 12.5 \\ 2 & 3.5 & 5.5 & 7 & 8.5 & 10.5 & 11 & 12.5 \\ 0.5 & 1.5 & 1.5 & 0.5 & 0.75 & 1.2 & 1.25 & 0.5 \\ 1.5 & 0.5 & 1 & 1.25 & 0.5 & 0.75 & 0.5 & 1.25 \end{pmatrix} \quad Y_{\text{par}} := \begin{pmatrix} 14 & 15.5 & 17.5 & 16.5 & 18.5 & 18 & 20.5 & 19.5 \\ 14 & 15.5 & 17.5 & 16.5 & 18.5 & 18 & 20.5 & 19.5 \\ 1.5 & 1.5 & 1.25 & 1.5 & 1.5 & 2.25 & 2.5 & 2.5 \\ 1.5 & 0.5 & 0.75 & 2.5 & 0.5 & 1.75 & 2.5 & 2.75 \end{pmatrix}$$

Рис. 1. Параметры регрессора и зависимой переменной (по столбцам матриц)

Каждый столбец матрицы на рисунке 1 описывает одно НЧ LR-типа в формате

$$\tilde{x}_j = (m_1 x_j \quad m_2 x_j \quad l s x_j \quad r s x_j)^T; \quad \tilde{y}_j = (m_1 y_j \quad m_2 y_j \quad l s y_j \quad r s y_j)^T, \quad j = \overline{1, N}.$$

Соответственно первая матрица содержит параметры восьми значений регрессора (X), а вторая – соответствующих значений зависимой переменной (Y).

В результате оптимизации получены следующие значения параметров коэффициентов ОПНР:

$$Pa = (13.658 \quad 13.658 \quad 0 \quad 0 \quad 1.228 \quad 0 \quad 1.543 \quad 0)^T,$$

$$Pb = (0.485 \quad 0.485 \quad 0.061 \quad 0.223 \quad 0.096 \quad 0.166 \quad 0.12 \quad 0.15)^T.$$

Средняя квадратическая ошибка аппроксимации, вычисленная по формуле (18) составила $RMSE_1 = 1.3$.

Вывод. Применение НЧНС в качестве коэффициентов модели ОПНР позволяет расширить функциональность последней. Во-первых, модель применима к любым НЧ, в том числе, отрицательным и знаконеопределенным. Во-вторых, исключается возможность получения в результате МНК-оценки отрицательных значений спрэдов, лишенных смысла. Дальнейшее направление исследований – произвести сравнительный анализ точности аппроксимации в рамках предлагаемой модели с альтернативными моделями на тестовых выборках.

Библиографический список

1. Bede B. Mathematics of Fuzzy Sets and Fuzzy Logic. – London: Springer, 2013. – 276 p.
2. J.M. Mendel and R.B. John, “Type-2 Fuzzy Sets Made Simple,” IEEE Transactions on Fuzzy Systems 10, no. 2 (2002): 117–127.
3. Бухенский К.В., Дюбуа А.Б., Конюхов А.Н. Исследование нечетких чисел LR-типа с нечеткими спрэдами LR-типа. // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2024 [текст]: сб. тр. VII междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.5./ под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2024., С. 17-21.

УДК 004.032.26; ГРНТИ 76.13.15

ВЫДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭКГ-СИГНАЛА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ЗАБОЛЕВАНИЙ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ МЕТОДАМИ ИИ

А.Р. Зиастинов*, С.Г. Мосин**

ФГБОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»
Российская Федерация, Казань, *ziastinvalmaz@gmail.com, **SGMosin@kpfu.ru

Аннотация. Рассмотрены методы автоматического анализа ЭКГ-сигналов для диагностики сердечно-сосудистых заболеваний с использованием сверточных нейронных сетей (CNN). Разработана архитектура CNN, адаптированная для обработки многомерных временных рядов ЭКГ. Проведено обучение модели на наборе данных *PTB-XL*, включающем 21 837 клинических записей. Наилучшие результаты показали конфигурации с пятью сверточными слоями и функцией активации *ReLU*, достигнув точности 74%. Предложены рекомендации по улучшению модели за счет применения модифицированных архитектур, таких как *ResNet* и *DenseNet*.

Ключевые слова: ЭКГ-сигналы, искусственный интеллект, сверточные нейронные сети, диагностика заболеваний, машинное обучение.

EXTRACTION OF CHARACTERISTIC ECG SIGNAL PARAMETERS FOR DIAGNOSING CARDIOVASCULAR DISEASES USING AI METHODS

A.R. Ziastinov*, S.G. Mosin**

Kazan Federal University

Russia, Kazan, *ziastinvalmaz@gmail.com, **SGMosin@kpfu.ru

Abstract. Methods for automatic analysis of ECG signals for diagnosing cardiovascular diseases using convolutional neural networks (CNN) are considered. A CNN architecture adapted for processing multidimensional ECG time series has been developed. The model was trained on the PTB-XL dataset containing 21,837 clinical records. The best results were shown by configurations with five convolutional layers and ReLU activation function, achieving an accuracy of 74%. Recommendations for improving the model through the use of modified architectures such as ResNet and DenseNet are proposed.

Keywords: ECG signals, artificial intelligence, convolutional neural networks, disease diagnosis, machine learning.

Современная медицина сталкивается с растущей потребностью в точной и быстрой диагностике заболеваний сердечно-сосудистой системы, являющихся основной причиной смертности и инвалидности в мире. Согласно Всемирной организации здравоохранения, сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) занимают лидирующие позиции среди причин смертности, ежегодно унося жизни около 18 миллионов человек [1]. При этом 80% преждевременных инфарктов и инсультов можно предотвратить. Поэтому профилактика и своевременная диагностика играют важную роль в борьбе с этими заболеваниями.

Электрокардиография (ЭКГ) является важнейшим инструментом для мониторинга и анализа электрической активности сердца. Доступность, неинвазивность, низкая стоимость и высокая информативность ЭКГ сделали её распространённым методом диагностики [2]. Однако интерпретация ЭКГ-сигналов остаётся сложной задачей, требующей высокой квалификации врачей [3]. В связи с этим, особое внимание уделяется методам искусственного интеллекта (ИИ), которые способны автоматизировать процесс анализа ЭКГ и повысить точность диагностики [4-6].

Цифровые алгоритмы на основе ИИ извлекают из кардиограммы больше информации, чем это возможно при традиционном анализе человеком. Современные методы машинного и глубокого обучения демонстрируют высокую эффективность в распознавании и классификации паттернов ЭКГ, открывая новые возможности для диагностики. Например, многослойные перцептроны, глубокие нейронные сети (*CNN*, *ResNet*, *LSTM*, *RNN*) достигли точности и чувствительности более 95% [7-9].

Цель данной работы заключается в повышении точности диагностики заболеваний сердечно-сосудистой системы с использованием *data-driven* методов, предобработки ЭКГ-сигналов и глубокого машинного обучения.

В данной статье будут рассмотрены этапы разработки модели ИИ для задачи классификации ССЗ по данным ЭКГ-сигналов.

Представление и сбор данных

Электрокардиография (ЭКГ) регистрирует электрические импульсы сердца с помощью электродов, накладываемых на тело. В клинической практике используют 12 отведений: стандартные (I, II, III), усиленные (*aVR*, *aVL*, *aVF*) и грудные (V1-V6).

ЭКГ-сигнал состоит из ключевых компонентов, отражающих фазы сердечного цикла [9]:

- **P волна:** деполяризация предсердий.

- **QRS комплекс:** деполяризация желудочков (включает *Q*, *R*, *S* волны).
- **T волна:** реполяризация желудочков.
- **U волна:** иногда наблюдается после *T* волны.

Важные интервалы и сегменты:

- **PR интервал:** время от *P* волны до *QRS* комплекса.
- **QT интервал:** от *QRS* до конца *T* волны.
- **ST сегмент:** между *QRS* и *T* волной (отклонения могут указывать на ишемию).

Амплитуда (мВ) и длительность (мс) волн и интервалов используются для диагностики. Например, длительность *QRS* в норме составляет 80-100 мс.

ЭКГ также оценивает ритм и частоту сердечных сокращений (ЧСС):

- **Синусовый ритм:** нормальный ритм с регулярными *P* волнами.
- **ЧСС:** норма у взрослых – 60-100 ударов в минуту.

Сигналы ЭКГ в 12 отведениях представляются как многомерный временной ряд с заданной частотой дискретизации.

Для разработки и обучения моделей глубокого обучения, необходимо наличие качественных и полных наборов данных. В ходе работы были рассмотрены наиболее популярные наборы данных, такие как: *MIT-BIH Arrhythmia Database*, *PTB Diagnostic ECG Database* и *PTB-XL (Physikalisch-Technische Bundesanstalt eXtended Lead)* [9-11]. Все наборы представляют собой записи ЭКГ-сигналов, аннотированные экспертами для различных целей, включая диагностику аритмий, ишемии и других сердечно-сосудистых заболеваний. Они обеспечивают разнообразие случаев и аннотаций, что делает их ценными ресурсами для разработки алгоритмов анализа ЭКГ

В настоящей работе был выбран набор данных *PTB-XL*, поскольку в наборе содержится наибольшее количество качественных размеченных данных.

PTB-XL представляет собой большой набор данных из 21 837 клинических ЭКГ в 12 отведениях от 18 885 пациентов продолжительностью 10 секунд. Исходные данные о форме сигнала были аннотированы двумя кардиологами, которые присвоили каждой записи потенциально несколько значений ЭКГ. В общей сложности 71 различное значение ЭКГ соответствует стандарту *SCP-ECG* и включает диагностические характеристики, форму и ритм [11]. Набор данных *PTB-XL* представляет собой обширный сборник данных, включающий в себя сигналы ЭКГ, представленные в виде многомерного временного ряда, длиной 1 000 отсчетов, в котором каждый отдельный временной ряд соответствуют измерениям в одном из двенадцати отведений (рис. 1).

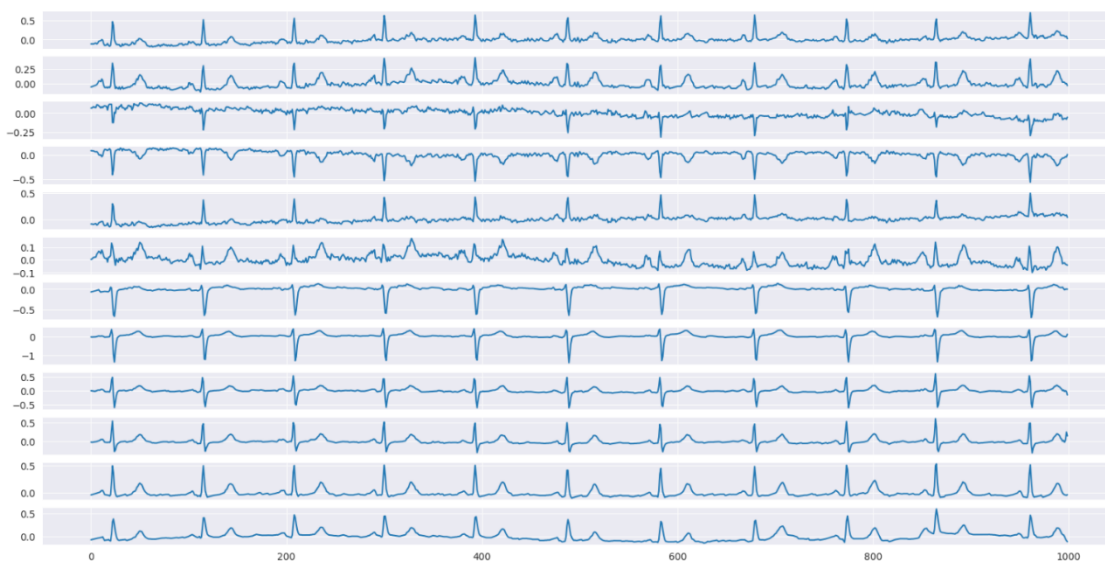


Рис. 1. Визуализация ЭКГ-сигнала в 12 отведениях

Архитектура модели ИИ

Для анализа ЭКГ-сигналов и диагностики сердечно-сосудистых заболеваний выбрана архитектура одномерной сверточной нейронной сети (*CNN*), эффективной для работы с временными рядами и изображениями благодаря способности извлекать значимые признаки из данных. ЭКГ-сигналы представляют собой многомерные временные ряды, где каждая строка соответствует одному из 12 отведений, а столбцы — временным отсчетам, что определяет одномерность сети. *CNN* выявляет сложные паттерны через многослойную структуру, включающую сверточные, объединяющие и полносвязные слои.

Сверточные слои выделяют признаки с помощью фильтров, которые проходят по данным, выполняя операцию свертки. Результат — карта признаков, показывающая активацию фильтра в различных участках сигнала. Формально выход сверточного слоя можно записать как:

$$O_{ij} = \sum_0^m \sum_0^n X_{i+m, j+n} K_{mn} + b,$$

где X — входной сигнал, K — фильтр (ядро свертки), b — смещение (*bias*). За сверточным слоем следует слой активации (например, *ReLU*, сигмоида или гиперболический тангенс), который нелинейно преобразует данные.

Объединяющие слои (*pooling*) уменьшают размерность данных, сохраняя важную информацию. Часто используются методы *max-pooling* (выбор максимального значения) или *average-pooling* (выбор среднего значения).

Полносвязный слой формирует классификационные признаки, определяя вероятность принадлежности элемента к определенному классу.

Обучение

Обучение модели глубокого обучения включает несколько ключевых этапов: подготовку данных, настройку гиперпараметров, выбор функции потерь и оптимизатора, а также оценку качества модели. В данной работе процесс обучения был организован следующим образом.

1. Предобработка данных

Данные были предобработаны для улучшения качества обучения. Основные этапы:

- *Нормализация*: ЭКГ-сигналы нормализованы до диапазона $[0, 1]$ или $[-1, 1]$.
- *Устранение шумов*: Применены фильтры для удаления артефактов и шумов.
- *Сегментация*: ЭКГ-сигналы разделены на сегменты фиксированной длины.
- *Аугментация*: Применены методы аугментации для увеличения разнообразия данных.

2. Разделение данных

Набор данных *PTB-XL* разделен на обучающую (70%), валидационную (15%) и тестовую (15%) выборки.

3. Настройка гиперпараметров

Настроены гиперпараметры: количество сверточных слоев, размер ядра свертки, количество фильтров, шаг свертки, функция активации, размер объединяющего слоя и количество нейронов в полносвязном слое.

4. Функция потерь и оптимизатор

Использована функция потерь кросс-энтропия и оптимизатор *Adam*.

5. Процесс обучения

Обучение проводилось на *GPU* с использованием 10 эпох, размера батча 32 или 64, и начальной скорости обучения 0.001. Применены методы регуляризации, такие как *Dropout* и *L2*-регуляризация.

6. Функция активации

В качестве функции активации использовались *ReLU (Rectified Linear Unit)* и *Tanh* (гиперболический тангенс).

7. Оценка качества модели

Оценка качества моделей проводилась по метрикам точности – *accuracy* и *precision*, полноты – *recall*, сбалансированной оценке – *F1-score* и анализу матрицы предсказаний

8. Результаты

Результаты показали, что *CNN* с пятью сверточными слоями, размером фильтров 5x5 и функцией активации *ReLU* обеспечивает наилучшую точность диагностики, достигая 87% точности на обучении и 70% на тесте. Помимо этого, благодаря применению методов преобработки, удалось повысить точность до 74% на тесте.

Заключение

Таким образом, результаты исследования демонстрируют потенциал глубокого обучения для повышения точности диагностики сердечно-сосудистых заболеваний. Дальнейшие исследования могут быть направлены на:

- улучшение точности и надежности моделей: исследование новых архитектур *CNN (ResNet, DenseNet, EfficientNet)*, применение аугментации данных и ансамблевых методов;
- расширение применения моделей: диагностика других заболеваний по ЭКГ и анализ данных с носимых устройств;
- Интеграция с клинической практикой: разработка удобных интерфейсов и проведение клинических испытаний.

Библиографический список

1. Сердечно-сосудистые заболевания / [Электронный ресурс] // Всемирная организация здравоохранения: [сайт]. – URL: [https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-\(cvds\)](https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds)) (дата обращения: 24.02.2024).
2. Значение ЭКГ и его возможности в диагностике заболеваний сердца / [Электронный ресурс] // МедУнивер: [сайт]. – URL: https://meduniver.com/Medical/cardiolegia/znachenie_ekg.html-MedUniver (дата обращения: 24.02.2024).
3. Мангушева М.М., Маянская С.Д., Исхакова Г.Г. К вопросу о трудностях ЭКГ диагностики инфаркта миокарда. Практическая медицина. 2019. Том 17, № 2, С. 15–20.
4. Анализ результатов ЭКГ искусственным интеллектом / [Электронный ресурс] // СберМедИИ: [сайт]. – URL: <https://sbermed.ai/iskusstvenniy-intellekt-v-analize-ekg> (дата обращения: 10.03.2024).
5. Нестерова Е.А. Основы электрокардиографии. Нормальная электрокардиография (модуль для непрерывного медицинского образования) – 2016. – Том 2, С. 80–85.
6. Мосин С.Г. Нейросетевая диагностика заболеваний сердечно-сосудистой системы на основе data-driven-метода // Программные продукты и системы. – 2024. – Т. 37, № 1, С. 122–130. doi: 10.15827/0236-235X.142.122-130
7. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory. *Neural Computation* – 1997. – Vol. 9, No. 8, P.1735–1780.
8. Strodthoff N., Strodthoff C. Detecting and interpreting myocardial infarction using fully convolutional neural networks. *Physiol Meas.* – 2019. – Vol. 40, No. 1, P. 2032–2040.
9. Acharya UR, Fujita H, Oh SL, Hagiwara Y, Tan JH, Adam M. Application of deep convolutional neural network for automated detection of myocardial infarction using ECG signals – 2018. – Vol. 8, No. 7, P. 1508–1512.
10. PTB Diagnostic ECG Database / [Электронный ресурс] // PhysioNet: [сайт]. – URL: <https://physionet.org/content/ptbdb/1.0.0/> (дата обращения: 21.03.2024).
11. PTB-XL, a large publicly available electrocardiography dataset / [Электронный ресурс] // PhysioNet: [сайт]. – URL: <https://physionet.org/content/ptb-xl/1.0.1/> (дата обращения: 21.03.2024).

УДК 517.98; ГРНТИ 28.23.37

ИССЛЕДОВАНИЕ НА УСТОЙЧИВОСТЬ НЕЙРОННОЙ СЕТИ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ МЕТОДОМ ЛЯПУНОВА

С.А. Нелюхин

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

Аннотация. В работе рассматривается искусственная нейронная сеть с обратной связью, описываемая системой нелинейных дифференциальных уравнений. Изучается устойчивость нейросети методом функции Ляпунова. Приводятся условия, при выполнении которых нейронная сеть достигает стационарного состояния.

Ключевые слова: детерминированная нейродинамика, нейронная сеть с обратной связью, функция активации, функция Ляпунова, устойчивость нелинейной динамической системы, система дифференциальных уравнений, нейронная сеть Хопфилда, теорема Коэна-Гроссберга.

A STUDY ON THE STABILITY OF A FEEDBACK NEURAL NETWORK USING THE LYAPUNOV METHOD

S.A. Nelukhin

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

Annotation: The paper considers an artificial neural network with feedback described by a system of nonlinear differential equations. The stability of a neural network is studied using the Lyapunov function method. The conditions under which the neural network reaches a stationary state are given.

Keywords: deterministic neurodynamics, feedback neural network, activation function, Lyapunov function, stability of a nonlinear dynamical system, system of differential equations, Hopfield neural network, Cohen-Grossberg theorem.

1. Постановка задачи

Раздел прикладной математики, в котором нейронные сети рассматриваются как нелинейные динамические системы, и главный вопрос касается проблемы их устойчивости, называется нейродинамикой (neurodynamics). Первые исследования по нейродинамике начались в 1938 году с работ, в которых биологические системы трактовались как нелинейные динамические системы [1].

Когда речь идет об устойчивости нелинейных динамических систем, то подразумевается устойчивость по Ляпунову, и в частности, метод функций Ляпунова [2, 3]. В этом случае модель нейронной сети описывается системой обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений, которая определяет эволюцию системы как функцию времени [4, 5, 6].

Одной из наиболее хорошо изученной нейродинамической моделью является аддитивная нейронная сеть Хопфилда [7], которая описывается системой дифференциальных уравнений

$$C_i \frac{d}{dt} v_i(t) = -\frac{v_i(t)}{R_i} + \sum_{j=1}^N \omega_{ij} \cdot \varphi_j(v_j(t)) + I_i \quad (i = 1, 2, \dots, N), \quad (1)$$

где N – количество нейронов;

$x_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, N$) – возбуждения, действующие на синаптические веса

ω_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, N$);

$v_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, N$) – индуцированное локальное поле на входе нелинейной функции активации $\varphi_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, N$), где

$$x_i(t) = \varphi(v_i(t)) \quad (i = 1, 2, \dots, N).$$

В [7] показано, что если в качестве функции Ляпунова взять

$$V(x) = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \omega_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^N \frac{1}{R_i} \int_0^{x_i} \varphi^{-1}(x) dx - \sum_{i=1}^N I_i x_i, \quad (2)$$

то ее полная производная $\frac{dV(x)}{dt}$ по времени в силу системы (1) будет отрицательно определенной, то есть функция (2) удовлетворяет теореме Ляпунова об асимптотической устойчивости. Это означает, что нейронная сеть Хопфилда обладает свойством устойчивости, то есть с течением некоторого конечного времени нейросеть сходится к стационарному состоянию (так называемому аттрактору системы), тем самым работает как ассоциативная память.

В [7, 8] рассматривается принцип достижения устойчивости нейронных сетей, которые описываются системой

$$\frac{d}{dt} v_i = a_i(v_i) \left(b_i(v_i) - \sum_{j=1}^N \omega_{ij} \cdot \varphi_j(v_j) \right) \quad (i = 1, 2, \dots, N), \quad (3)$$

где синаптические веса ω_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, N$) обладают условием симметричности;

функции $a_i(\cdot)$ ($i = 1, 2, \dots, N$) неотрицательны;

функции активации $\varphi_i(\cdot)$ ($i = 1, 2, \dots, N$) обладают условием монотонности, $\varphi_i'(v_i) \geq 0$ ($i = 1, 2, \dots, N$).

При выполнении этих условий функция Ляпунова для системы (3) имеет вид

$$V(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \omega_{ij} \varphi_i(v_i) \varphi_j(v_j) - \sum_{i=1}^N \int_0^{v_i} b_i(x) \varphi_i'(x) dx,$$

причем ее полная производная в силу (3) является отрицательно определенной функцией, то есть нейронная сеть, соответствующая (3) является асимптотически устойчивой.

2. Основные результаты

Рассмотрим нейронную сеть с обратной рекуррентной связью [7]. Соответствующая ей система дифференциальных уравнений имеет вид

$$\dot{x}_i = -A_i x_i + (B_i - x_i)(I_i + f_i(x_i)) - (x_i + C_i) \left(J_i + \sum_{j=1}^N \omega_{ij} \cdot \varphi_j(x_j) \right) \quad (i = 1, 2, \dots, N), \quad (4)$$

где N – количество нейронов, $\dot{x}_i \equiv \frac{dx_i}{dt}$, A_i, B_i, C_i, I_i, J_i – положительные константы ($i, j = \overline{1, N}$), $\Omega = (\omega_{ij})$ – симметрическая $N \times N$ -матрица синаптических весов нейронной сети ($\omega_{ij} = \omega_{ji}$, $i, j = \overline{1, N}$), $\varphi_j(\cdot)$ – функция активации нейронной сети (с условием строгой монотонности, $\varphi_j'(x) > 0$ при всех $x \in \mathbf{R}$, $j = \overline{1, N}$), $f_i(\cdot)$ – непрерывная положительная функция аргумента x_i . При этом в силу специфики самой нейронной сети, которая описывается системой дифференциальных уравнений (4) предполагаем, что $x_i \in [-C_i; B_i]$.

Применяя к системе (4) замену $y_i = x_i + C_i$, получим ($x_i = y_i - C_i$, $y_i \in [0; B_i + C_i]$, $i = \overline{1, N}$):

$$\dot{y}_i = -A_i y_i + A_i C_i + (B_i + C_i) I_i + (B_i + C_i) f_i(y_i - C_i) - I_i y_i - y_i f_i(y_i - C_i) - J_i y_i - \sum_{j=1}^N \omega_{ij} \varphi_j(y_j - C_j) \cdot y_i,$$

или после введения обозначений: $K_i^{(1)} = -(A_i + I_i + J_i) < 0$, $K_i^{(2)} = A_i C_i + (B_i + C_i) I_i > 0$,

$$b_i(y_i) = K_i^{(2)} + K_i^{(1)} y_i + (B_i + C_i - y_i) f_i(y_i - C_i), \quad d_i(y_i) = \varphi_i(y_i - C_i), \quad \text{систему}$$

$$\dot{y}_i = b_i(y_i) - \sum_{j=1}^N \omega_{ij} \cdot d_j(y_j) \cdot y_i, \quad (i = \overline{1, N}). \quad (5)$$

Для того, чтобы нейронная сеть трактовалась как ассоциативная память (восстанавливала необходимую информацию), необходимо, чтобы запоминаемые образы (обозначим каждый из них $\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N)$) должны быть стационарными состояниями динамической системы (5), то есть, чтобы выполнялось условие

$$b_i(\xi_i) - \sum_{j=1}^N \omega_{ij} \cdot d_j(\xi_j) \cdot \xi_i = 0, \quad \xi_i \geq 0 \quad (i = \overline{1, N}). \quad (6)$$

Предположим, что нейросеть обучена таким образом, что (6) имеет некоторое непустое множество $\Lambda = (\xi^{(1)}, \xi^{(2)}, \dots, \xi^{(k)})$ стационарных состояний, где $\xi^{(j)} = (\xi_1^{(j)}, \xi_2^{(j)}, \dots, \xi_N^{(j)})$. При этом каждое стационарное состояние $\xi^{(j)} = (\xi_1^{(j)}, \xi_2^{(j)}, \dots, \xi_N^{(j)})$ определяет соответствующий кодирующий образ нейронной сети.

Исследуем динамику системы (6) в окрестности фиксированного состояния равновесия $\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N)$. Обозначим $S(\xi, r) = \{x = x(t) : \|x\| = \|y - \xi\| < r\}$ – открытый шар с центром в точке $\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N)$ и радиуса $r > 0$.

Дальнейшая теория основана на двух основных теоремах.

Теорема 1. Пусть:

- 1) каждая из функций $b_i(\cdot)$ ($i = \overline{1, N}$), определенная условием

$$b_i(y_i) = K_i^{(2)} + K_i^{(1)} y_i + (B_i + C_i - y_i) f_i(y_i - C_i),$$

($K_i^{(1)} < 0$, $K_i^{(2)} > 0$, $i = \overline{1, N}$) строго монотонно убывает, и ее производная

$$b_i'(y_i) = K_i^{(1)} - f_i(y_i - C_i) + (B_i + C_i - y_i) f_i'(y_i - C_i)$$

ограничена, обозначим $M_i = \sup_{y_i} \{b_i'(y_i)\} < 0$ ($i = \overline{1, N}$);

- 2) существует постоянная величина $\delta > 0$ такая, что при всех $x \in S(\xi, r)$ выполняется неравенство:

$$\sum_{i=1}^N x_i \left(-\delta (b_i(y_i) - b_i(\xi_i)) - \sum_{j=1}^N \omega_{ij} (d_j(y_j) \cdot y_i - d_j(\xi_j) \cdot \xi_i) \right) < 0. \quad (7)$$

Тогда, если начальное состояние $y(0)$ нейросети принадлежит некоторому открытому шару $S(\xi, r)$, то состояние $y(t)$ достигает произвольную малую ε -окрестность $S(\xi, \varepsilon)$ стационарного состояния после конечного времени $t \geq t^*$, где

$$t^* = \frac{\ln(\varepsilon/r)}{(1+\delta)M} \quad (\varepsilon < r), \quad (8)$$

где $M = \max_{1 \leq i \leq N} \{M_i\} < 0$.

Доказательство. Рассмотрим функцию

$$L(x) = \sum_{i=1}^N x_i^2, \quad x = y - \xi.$$

Найдем полную производную этой функции в силу системы (5):
 $\frac{dL(x)}{dt} = 2 \sum_{i=1}^N x_i(t) \cdot \frac{dx_i(t)}{dt}$. Учитывая систему (5) и условие (6), получим

$$\frac{dL(x)}{dt} = 2 \sum_{i=1}^N x_i(t) \cdot \frac{dx_i(t)}{dt} = 2 \sum_{i=1}^N x_i(t) \cdot \left[b_i(y_i) - b_i(\xi_i) - \sum_{j=1}^N \omega_{ij} \cdot (d_j(y_j) \cdot y_i - d_j(\xi_j) \cdot \xi_i) \right].$$

Так как все функции $b_i(\cdot)$ непрерывны ($i = \overline{1, N}$), то существует число ζ_i такое, что разность $b_i(y_i) - b_i(\xi_i)$ можно представить в виде

$$b_i(y_i) - b_i(\xi_i) = b_i'(\zeta_i)(y_i - \xi_i) = b_i'(\zeta_i)x_i, \quad i = \overline{1, N}.$$

Тогда при выполнении неравенства (7) получим

$$\begin{aligned} \frac{dL(x)}{dt} &= 2 \sum_{i=1}^N x_i \cdot \left[b_i'(\zeta_i)x_i - \sum_{j=1}^N \omega_{ij} \cdot (d_j(y_j) \cdot y_i - d_j(\xi_j) \cdot \xi_i) \right] = \\ &= 2 \sum_{i=1}^N x_i \cdot \left[(1+\delta - \delta)b_i'(\zeta_i)x_i - \sum_{j=1}^N \omega_{ij} \cdot (d_j(y_j) \cdot y_i - d_j(\xi_j) \cdot \xi_i) \right] = \\ &= 2(1+\delta) \sum_{i=1}^N x_i^2 \cdot b_i'(\zeta_i) + 2 \sum_{i=1}^N x_i \left[(-\delta)b_i'(\zeta_i) - \sum_{j=1}^N \omega_{ij} \cdot (d_j(y_j) \cdot y_i - d_j(\xi_j) \cdot \xi_i) \right] < \\ &< 2(1+\delta) \sum_{i=1}^N x_i^2 \cdot b_i'(\zeta_i) \leq 2(1+\delta) \sum_{i=1}^N M_i x_i^2 \leq 2(1+\delta)M \sum_{i=1}^N x_i^2 = 2(1+\delta)M \cdot L(x). \end{aligned}$$

Итак, при выполнении 1), 2) теоремы 1 для полной производной в силу системы (5)

$$\frac{dL(x)}{dt} < 2(1+\delta)M \cdot L(x). \quad (9)$$

Из неравенства (9) в результате интегрирования по $t \in [0; t]$ получим:

$$\frac{dL(x)}{L(x)} < 2(1+\delta)M dt \Leftrightarrow L(x(t)) < L(x(0)) \cdot e^{2(1+\delta)Mt}.$$

Из определения функции $L(\cdot)$ имеем $L(x(0)) = \sum_{i=1}^N x_i^2(0) = \|x(0)\|^2$. Тогда

$$L(x(t)) < L(x(0)) \cdot e^{2(1+\delta)Mt} \Leftrightarrow \|x(t)\|^2 \leq \|x(0)\|^2 \cdot e^{2(1+\delta)Mt} \Leftrightarrow \|x(t)\| \leq \|x(0)\| \cdot e^{(1+\delta)Mt}.$$

Тогда, если начальное состояние $y(0)$ нейросети принадлежит некоторому открытому шару $S(\xi, r) = \{x(0): \|x(0)\| < r\}$, то состояние нейросети достигает произвольную малую ε -окрестность $S(\xi, \varepsilon)$ ($\varepsilon < r$) при выполнении неравенства

$$\|y(t) - \xi\| = \|x(t)\| \leq \|x(0)\| \cdot e^{(1+\delta)Mt} < \varepsilon,$$

откуда $t \geq t^*$, где $t^* = \frac{\ln(\varepsilon/r)}{(1+\delta)M}$. Теорема доказана.

Теорема 1 устанавливает достаточные условия, которые гарантируют, что области некоторых малых размеров существуют около стационарных состояний, где имеет место сходимость состояний нейросети к стационарным состояниям. Это означает способность нейросети восстанавливать ее запомненные образы. Очевидно, что условия (7) в теореме 1 достаточно сложны для аналитической проверки.

Теорема 2. Условие 2) теоремы 1 выполняется в некотором открытом шаре $S(\xi, r) = \{x: \|x\| = \|y - \xi\| < r\}$, если в этом шаре выполняется неравенство

$$\delta < \frac{\|\Omega\|(d_1 r + d_2 + d_1 \|\xi\|)}{-\min B_i}, \quad (10)$$

где $\|\Omega\| = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N |\omega_{ij}|$, $B_i = \inf_{y_i} \{b'_i(y_i)\} < 0$, $d_1 = \max \{d'_i(\eta_i)\}$, $d_2 = \max_{1 \leq i \leq N} \{d_i(x)\}$.

Доказательство. Воспользуемся неравенством (7) и перепишем его в виде

$$\sum_{i=1}^N x_i (-\delta)(b_i(y_i) - b_i(\xi_i)) < \sum_{i=1}^N x_i \left(\sum_{j=1}^N \omega_{ij} (d_j(y_j) \cdot y_j - d_j(\xi_j) \cdot \xi_j) \right). \quad (11)$$

Оценим сначала левую часть неравенства (11):

$$\sum_{i=1}^N x_i (-\delta)(b_i(y_i) - b_i(\xi_i)) = -\delta \sum_{i=1}^N x_i (b'_i(\eta_i) x_i) > -\delta \min_{1 \leq i \leq N} B_i \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2 = -\delta \min_{1 \leq i \leq N} B_i \cdot \|x\|^2, \quad (12)$$

где $B_i = \inf_{y_i} \{b'_i(y_i)\}$.

Проведем далее оценку правой части неравенства (11). Рассмотрим разности

$$d_j(y_j) - d_j(\xi_j) \quad (j \in \{1, 2, \dots, N\}).$$

Так как функция $d_j(\cdot)$ непрерывна, то по теореме Лагранжа найдется число η_j такое, что

$$d_j(y_j) - d_j(\xi_j) = d'_j(\eta_j)(y_j - \xi_j) = d'_j(\eta_j)x_j \quad (j \in \{1, 2, \dots, N\}).$$

Рассмотрим разности $d_j(y_j) \cdot y_j - d_j(\xi_j) \cdot \xi_j$:

$$\begin{aligned} d_j(y_j) \cdot y_i - d_j(\xi_j) \cdot \xi_i &= (d_j(\xi_j) + d'_j(\eta_j)x_j) \cdot (x_i + \xi_i) - d_j(\xi_j) \cdot \xi_i = \\ &= d_j(\xi_j)x_i + d'_j(\eta_j)x_ix_j + d'_j(\eta_j)x_j\xi_i. \end{aligned}$$

Тогда правая часть (по абсолютной величине)

$$\begin{aligned} &\left| \sum_{i=1}^N x_i \left(\sum_{j=1}^N \omega_{ij} (d_j(y_j) \cdot y_i - d_j(\xi_j) \cdot \xi_i) \right) \right| = \left| \sum_{i=1}^N x_i \left(\sum_{j=1}^N \omega_{ij} (d_j(\xi_j)x_i + d'_j(\eta_j)x_ix_j + d'_j(\eta_j)x_j\xi_i) \right) \right| \leq \\ &\leq \left| \sum_{i=1}^N x_i^2 \sum_{j=1}^N \omega_{ij} d'_j(\eta_j)x_j \right| + \left| \sum_{i=1}^N x_i^2 \sum_{j=1}^N \omega_{ij} d_j(\xi_j) \right| + \left| \sum_{i=1}^N x_i \sum_{j=1}^N \omega_{ij} d'_j(\eta_j)x_j\xi_i \right|. \end{aligned}$$

Далее по отдельности оценим каждое из полученных трех слагаемых:

$$\begin{aligned} &\left| \sum_{i=1}^N x_i^2 \sum_{j=1}^N \omega_{ij} d'_j(\eta_j)x_j \right| = \left| x_1^2 \sum_{j=1}^N \omega_{1j} d'_j(\eta_j)x_j + x_2^2 \sum_{j=1}^N \omega_{2j} d'_j(\eta_j)x_j + \dots + x_N^2 \sum_{j=1}^N \omega_{Nj} d'_j(\eta_j)x_j \right| \leq \\ &\leq x_1^2 \cdot \sum_{j=1}^N |\omega_{1j}| |d'_j(\eta_j)| |x_j| + x_2^2 \cdot \sum_{j=1}^N |\omega_{2j}| |d'_j(\eta_j)| |x_j| + \dots + x_N^2 \cdot \sum_{j=1}^N |\omega_{Nj}| |d'_j(\eta_j)| |x_j| \leq \\ &\leq x_1^2 \|\Omega\| d_1 \sum_{j=1}^N |x_j| + x_2^2 \|\Omega\| d_1 \sum_{j=1}^N |x_j| + \dots + x_N^2 \|\Omega\| d_1 \sum_{j=1}^N |x_j| = \\ &\leq r \|\Omega\| d_1 (x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2) = r \|\Omega\| d_1 \|x\|^2, \end{aligned}$$

(здесь учтено, что $d_1 = \max_{1 \leq i \leq N} \{d'_i(\eta_i)\}$),

$$\left| \sum_{i=1}^N x_i^2 \sum_{j=1}^N \omega_{ij} d_j(\xi_j) \right| \leq \|\Omega\| d_2 \|x\|^2, \quad d_2 = \max_{1 \leq i \leq N} \{d_i(x)\},$$

$$\begin{aligned} &\left| \sum_{i=1}^N x_i \xi_i \sum_{j=1}^N \omega_{ij} d'_j(\eta_j)x_j \right| = \left| x_1 \xi_1 \cdot \sum_{j=1}^N \omega_{1j} d'_j(\eta_j)x_j + x_2 \xi_2 \cdot \sum_{j=1}^N \omega_{2j} d'_j(\eta_j)x_j + \dots + x_N \xi_N \cdot \sum_{j=1}^N \omega_{Nj} d'_j(\eta_j)x_j \right| \leq \\ &\leq \left| x_1 \xi_1 \cdot \sum_{j=1}^N \omega_{1j} d'_j(\eta_j)x_j \right| + \left| x_2 \xi_2 \cdot \sum_{j=1}^N \omega_{2j} d'_j(\eta_j)x_j \right| + \dots + \left| x_N \xi_N \cdot \sum_{j=1}^N \omega_{Nj} d'_j(\eta_j)x_j \right| \leq \\ &\leq |x_1 \xi_1| \cdot \left| \sum_{j=1}^N \omega_{1j} d'_j(\eta_j)x_j \right| + |x_2 \xi_2| \cdot \left| \sum_{j=1}^N \omega_{2j} d'_j(\eta_j)x_j \right| + \dots + |x_N \xi_N| \cdot \left| \sum_{j=1}^N \omega_{Nj} d'_j(\eta_j)x_j \right| \leq \\ &\leq \|\Omega\| d_1 \|x\| \cdot (|x_1 \xi_1| + |x_2 \xi_2| + \dots + |x_N \xi_N|) = \|\Omega\| d_1 \|x\| \cdot \sum_{i=1}^N |x_i \xi_i| \leq \|\Omega\| d_1 \|x\| \cdot \|x\| \cdot \|\xi\| = \|\Omega\| d_1 \|x\|^2 \cdot \|\xi\| \end{aligned}$$

(использовали неравенство Коши-Буняковского $\sum_{i=1}^N |a_i b_i| \leq \sum_{i=1}^N |a_i|^2 \cdot \sum_{i=1}^N |b_i|^2 = \|a\| \cdot \|b\|$, где

$$a = (a_1, a_2, \dots, a_N), \quad b = (b_1, b_2, \dots, b_N)).$$

Итак, приходим к следующей оценке правой части неравенства (8):

$$\left| \sum_{i=1}^N x_i \left(\sum_{j=1}^N \omega_{ij} (d_j(y_j) \cdot y_i - d_j(\xi_j) \cdot \xi_i) \right) \right| \leq r \|\Omega\| d_1 \|x\|^2 + \|\Omega\| d_2 \|x\|^2 + \|\Omega\| d_1 \|x\|^2 \cdot \|\xi\|. \quad (13)$$

Используя неравенства (11) – (13) имеем (сокращаем на $\|x\|^2$)

$$-\delta \min_{1 \leq i \leq N} B_i > \|\Omega\| (rd_1 + d_2 + d_1 \|\xi\|) \Leftrightarrow \delta < \frac{\|\Omega\| (d_1 r + d_2 + d_1 \|\xi\|)}{-\min B_i}.$$

Теорема доказана.

Теоремы 1 и 2 дают достаточные условия, при которых рассматриваемая нейросеть сходится к ближайшему стационарному состоянию (аттрактору сети), и достигает малой окрестности этого стационарного состояния за конечный промежуток времени.

3. Компьютерный эксперимент. Рассмотрим нейронную сеть с $N = 3$ нейронами. В качестве функций $b_i(\cdot)$, $\varphi_i(\cdot)$ ($i = 1, 2, 3$) возьмем

$$b_1(y_1) = 5 - 2y_1 + (1 - y_1)y_1^2, \quad b_2(y_2) = 6 - 3y_2 + (2 - y_2)y_2^3, \quad b_3(y_3) = 8 - 5y_3 + (3 - y_3)y_3^2,$$

$$\varphi_i(y_i) = \frac{1 - \exp(-y_i)}{1 + \exp(-y_i)}, \quad d_1(y_1) = \varphi_1(y_1 - 4), \quad d_2(y_2) = \varphi_2(y_2 - 5), \quad d_3(y_3) = \varphi_3(y_3 - 4).$$

Предположим, что нейронная сеть обучена таким образом, что матрица синаптических весов имеет вид

$$\Omega = \frac{1}{10} \begin{pmatrix} 4 & 2 & 4 \\ 2 & 6 & -2 \\ 4 & -2 & 1 \end{pmatrix}, \quad \|\Omega\| = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N |\omega_{ij}| = 1.$$

В этом случае система (6) имеет единственную стационарную точку

$$\xi^* = (1, 4062; 1, 8827; 2, 2334).$$

Используя теорему 1, получим, что каждая из функций $b_i(\cdot)$ ($i = 1, 2, 3$) строго монотонно убывает при $y_i > 0$ ($i = 1, 2, 3$), причем

$$M_1 = \sup_{y_1 > 0} \{b_1'(y_1)\} = -5/3, \quad M_2 = \sup_{y_2 > 0} \{b_2'(y_2)\} = -1, \quad M_3 = \sup_{y_3 > 0} \{b_3'(y_3)\} = -2.$$

Используя теорему 2, положим $r = 0, 1$. В этом случае непосредственно получаем

$$B_1 = \inf_{y_1} \{b_1'(y_1)\} = -5, 7933, \quad B_2 = \inf_{y_2} \{b_2'(y_2)\} = -10, 5901, \quad B_3 = \inf_{y_3} \{b_3'(y_3)\} = -7, 3342.$$

$$d_1 = 1, \quad d_2 = 0, 5.$$

Неравенство (10) теоремы 2 принимает вид

$$\delta < \frac{\|\Omega\| (d_1 r + d_2 + d_1 \|\xi\|)}{-\min B_i} = 0, 20461.$$

Взяв в качестве $\delta = 0, 2046$, $\varepsilon = 0, 01$, получим по теореме 1 предельное время $t^* = \frac{\ln(\varepsilon/r)}{(1+\delta)M} = 0, 956$, при котором нейронная сеть достигнет стационарного состояния ξ^* (аттрактора сети).

На рисунке 1 представлены интегральные кривые системы дифференциальных уравнений, соответствующей рассматриваемой нейросети (при различных начальных условиях).

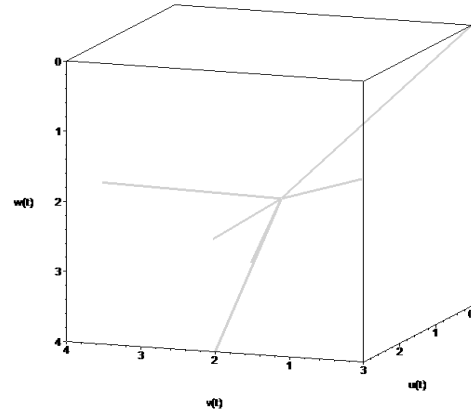


Рис. 1.

Библиографический список

1. Rashevsky N. *Mathematical Biophysics*, Chicago: Universty of Chicago Press, 1938.
2. Ляпунов А. М. *Общая задача об устойчивости движения*. М.: Гостехиздат, 1950. 472 с.
3. Малкин И. Г. *Некоторые задачи теории нелинейных колебаний*. М.: Гостехиздат, 1956. 491 с.
4. Hopfield J.J. "Learning algorithms and probability distributions in feed-forward and feed-back networks", *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 1987, vol. 84, p. 8429-8433.
5. Hopfield J.J. "Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities", *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 1982, vol. 79, p. 2554-2558.
6. Grossberg S. "Nonlinear difference-differential equations in prediction and learning theory", *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 1967, vol. 58, p. 1329-1334.
7. Хайкин, Саймон. *Нейронные сети: полный курс, 2-е издание.*: Пер. с англ. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2006. – 1104.
8. Cohen M.A. and S. Grossberg. "Absolute stability of global pattern formation and parallel memory storage by competitive neural networks", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1983, vol. SMC-13, p. 815-826.

УДК 519.242; ГРНТИ 27.43.

МЕТОДЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ОБЪЕКТОВ С ОГРАНИЧЕНИЯМИ

Е.В. Городничева, Ю.А. Сосулин

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, gorod.9@mail.ru, sosulin45@mail.ru*

Аннотация. Рассматривается задача планирования и организации эксперимента при исследовании объектов с ограничениями на значение выходной величины. Предлагаются методы факторного планирования, обеспечивающие решение задачи получения регрессионной модели исследуемого объекта при сохранении основных свойств полного факторного эксперимента.

Ключевые слова: планирование эксперимента, регрессионный анализ, полный факторный эксперимент.

METHODS OF EXPERIMENTAL PLANNING WHEN STUDYING OBJECTS WITH RESTRICTIONS

E.V. Gorodnicheva, Yu.A. Sosulin

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, gorod.9@mail.ru, sosulin45@mail.ru*

Abstract. The problem of planning and organizing an experiment when studying objects with restrictions on the value of the output variable is considered. Factorial planning methods are proposed that ensure the solution of the problem of obtaining a regression model of the object under study while maintaining the basic properties of a full factorial experiment.

Keywords: experimental planning, regression analysis, full factorial experiment.

Существует большой класс объектов, выходная величина которых в определенной области пространства планирования ограничена некоторым предельным значением. Это может быть следствием технических или технологических свойств объекта, используемых методов и средств измерения и контроля выходной величины объекта. Вне этой области функция отклика может быть представлена квадратичной регрессионной моделью вида [1]:

$$\hat{y}(x) = b_0 + \sum_{i=1}^m b_i x_i + \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^m b_{ii} x_i^2.$$

Для построения регрессионной модели обычно используются трехуровневые полные факторные планы. В этом случае зависимость выходной величины объекта от определяющих ее факторов представляется параболоидом в многомерном пространстве с усеченной вершиной.

Для описания такой зависимости в виде регрессионной модели, работоспособной во всей области факторного пространства, ограниченной пространством планирования, требуется существенное увеличение степени аппроксимирующего полинома. Это, в свою очередь, приводит к значительному увеличению требуемого для построения регрессионной модели числа наблюдений. Очевидно, что измерения в области пространства планирования, в пределах которой функция отклика имеет некоторое фиксированное значение, являются неинформативными при построении квадратичной регрессионной модели.

В данной ситуации для решения задачи построения математической модели объекта при наличии ограничений на значения функции отклика может быть предложена следующая процедура.

Измерения выполняются в пределах активной области пространства планирования в соответствии с некоторым планом. На основании данных наблюдений получается квадратичная регрессионная модель, которая носит виртуальный характер для области ограничений. Таким образом, решение задачи построения математической модели объекта с ограничениями на значение выходной величины получается как совместное решение полученной регрессионной зависимости и уравнения, задающего ограничения на значения функции отклика. В результате будет получено уравнение эллипсоида фиксированных значений функции отклика в факторном пространстве.

При решении задачи построения экспериментального плана, необходимого для проведения наблюдений, предполагается использование пространства планирования, имеющего стандартные ограничения в виде неравенств $-1 \leq x_i \leq +1$ по каждой переменной и область, недоступную для проведения наблюдений, в центре пространства планирования, ограниченную неравенствами $-a \leq x_i \leq +a$.

При таких ограничениях на пространство планирования факторные планы, а также планы, соответствующие другим известным критериям оптимальности, для решения поставленной задачи не могут использоваться, так как они включают центральную точку пространства планирования [2].

Планы проведения наблюдений с учетом ограничений на пространство планирования могут быть получены с использованием предлагаемых процедур корректировки известных для полной области пространства планирования экспериментальных планов.

Полные факторные планы, широко используемые для решения задачи идентификации, обладают хорошими информационными характеристиками и обеспечивают несмешанное оценивание коэффициентов регрессии. При корректировке этих планов, вызванной изменением пространства планирования, характеристики получаемых планов и их свойства будут отличаться от характеристик исходных планов. Для сопоставления получаемых в результате корректировок планов и их сравнения с исходными планами может быть принят

след ковариационно-дисперсионной матрицы, характеризующий общую точность оценок коэффициентов регрессии, а значит точность регрессионной модели.

Исследование возможности корректировки полных факторных планов для решения задачи построения регрессионной модели с ограничениями выполнено на примере двухфакторной модели второго порядка. Полный факторный план ε для такой модели сосредоточен в углах квадрата $-1 \leq x_i \leq +1$, ограничивающего пространство планирования, в серединах ребер и в центре квадрата. Дисперсионная матрица $C(\varepsilon)$ такого плана имеет вид:

$$C(\varepsilon) = \begin{bmatrix} 5 & 0 & 0 & 0 & -3 & -3 \\ 0 & 1,5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1,5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2,25 & 0 & 0 \\ -3 & 0 & 0 & 0 & 4,5 & 0 \\ -3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4,5 \end{bmatrix}$$

и след матрицы $trC(\varepsilon) = 19,25$.

Полный факторный план, учитывающий область ограничений на выполнение измерений, может быть получен из плана ε отображением центральной точки плана на границу области ограничений $-a \leq x_i \leq +a$. Очевидно, что наиболее целесообразной будет замена центральной точки плана ε на одну из угловых точек квадрата области ограничений или на одну из середин ребер этого квадрата. Учитывая симметричность рассматриваемой модели и пространства планирования, выбор конкретной угловой точки или середины ребра не будет сказываться на характеристиках получаемых планов. В результате рассматриваемых замен и для значения $a = 0,25$ могут быть получены два плана ε_1 и ε_2 с дисперсионными матрицами

$$C(\varepsilon_1) = \begin{bmatrix} 6,35 & -0,18 & -0,18 & -0,07 & -3,84 & -3,84 \\ -0,47 & 1,48 & -0,017 & -0,06 & 0,28 & 0,28 \\ -0,47 & -0,02 & 1,48 & -0,06 & 0,28 & 0,28 \\ -0,35 & -0,01 & -0,01 & 2,25 & 0,21 & 0,21 \\ -3,95 & 0,10 & 0,10 & 0,04 & 5,09 & 0,59 \\ -3,95 & 0,10 & 0,10 & 0,04 & 0,59 & 5,09 \end{bmatrix}$$

$$C(\varepsilon_2) = \begin{bmatrix} 5,63 & -0,19 & 0 & 0 & -3,47 & -3,32 \\ -0,44 & 1,48 & 0 & 0 & 0,26 & 0,27 \\ 0 & 0 & 1,50 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2,25 & 0 & 0 \\ -3,78 & 0,10 & 0 & 0 & 5,01 & 0,44 \\ -3,12 & 0,13 & 0 & 0 & 0,13 & 4,53 \end{bmatrix}$$

со следами $trC(\varepsilon_1) = 21,73$ и $trC(\varepsilon_2) = 20,41$ соответственно.

Анализ полученных результатов показывает, что любая из приведенных замен приводит к смешиванию получаемых оценок коэффициентов и к снижению точности оценивания.

Существенное улучшение характеристик получаемых планов дает подход, заключающийся не в отображении центральной точки плана на границу области $-a \leq x_i \leq +a$, а ее расщепление и замена группой точек на границе области ограничений. При этом представляется целесообразным сохранение основного принципа построения полных факторных планов: перебор всех возможных сочетаний значений факторов, варьируемых на заданном числе

уровней. Для рассматриваемой задачи это будет трехуровневое варьирование на квадрате $-a \leq x_i \leq +a$, определяющем область ограничений, за исключением центральной точки.

Полученный таким образом планы ε_3 будет представлять собой множество угловых точек квадрата $-1 \leq x_i \leq +1$, ограничивающего пространство планирования, множество середин ребер этого квадрата, множество угловых точек квадрата $-a \leq x_i \leq +a$, определяющего область ограничений, и множество середин ребер области ограничений. Дисперсионная матрица этого плана для значения $a = 0,25$ имеет вид:

$$C(\varepsilon_3) = \begin{bmatrix} 2,02 & 0 & 0 & 0 & -1,29 & -1,29 \\ 0 & 2,51 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2,51 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3,98 & 0 & 0 \\ -1,29 & 0 & 0 & 0 & 5,59 & -2,37 \\ -1,29 & 0 & 0 & 0 & -2,37 & 5,59 \end{bmatrix}$$

и ее след $trC(\varepsilon_3) = 22,22$.

Приведенные результаты показывают, что полученный факторный план обеспечивает несмешанное оценивание коэффициентов регрессии при соизмеримой с полным факторным планом ε эффективностью оценивания, но приводит к увеличению числа экспериментальных точек.

Рост числа наблюдений приводит к увеличению экспериментальных затрат почти в два раза. В этом случае предотвращение значительного увеличения числа наблюдений и сохранение свойств полного факторного планирования возможно, если выбрать не все возможные сочетания значений факторов, варьируемых на заданном числе уровней на границе области ограничений $-a \leq x_i \leq +a$, а только множество угловых точек или множество середин ребер области ограничений.

Полученные таким образом планы ε_4 и ε_5 будут представлять собой множество угловых точек квадрата $-1 \leq x_i \leq +1$, ограничивающего пространство планирования, множество середин ребер этого квадрата и множество угловых точек квадрата $-a \leq x_i \leq +a$, определяющего область ограничений или множество середин ребер этого квадрата. Вследствие рассматриваемых замен и для значения $a = 0,25$ дисперсионные матрицы принимают вид:

$$C(\varepsilon_4) = \begin{bmatrix} 3,58 & 0 & 0 & 0 & -2,21 & -2,21 \\ 0 & 1,85 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1,85 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2,95 & 0 & 0 \\ -2,47 & 0 & 0 & 0 & 5,12 & -0,88 \\ -2,47 & 0 & 0 & 0 & -0,88 & 5,12 \end{bmatrix}$$

$$C(\varepsilon_5) = \begin{bmatrix} 2,95 & 0 & 0 & 0 & -1,80 & -1,80 \\ 0 & 1,92 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1,92 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3,00 & 0 & 0 \\ -1,91 & 0 & 0 & 0 & 4,72 & -1,19 \\ -1,91 & 0 & 0 & 0 & -1,19 & 4,72 \end{bmatrix}$$

со следами $trC(\varepsilon_4) = 20,45$ и $trC(\varepsilon_5) = 19,25$ соответственно.

Аналогичным образом получены экспериментальные планы с заменой центральной точки плана ε и соответствующие им дисперсионные матрицы для значений плеча области ограничений 0,5 и 0,75.

Полученные результаты представлены в таблице 1, где за показатель эффективности принят след ковариационно-дисперсионной матрицы экспериментального плана.

Таблица 1. Показатель эффективности при замене центральной точки плана ε в зависимости от размера плеча области ограничений

Размер плеча области ограничений	$a = 0,25$	$a = 0,5$	$a = 0,75$
Замена центральной точки плана ε на			
угловую точку области ограничений	21,73	23,30	26,50
середину ребра области ограничений	20,41	21,18	22,57
область ограничений, без центральной точки	22,22	22,97	25,23
множество угловых точек области ограничений	20,45	21,89	27,25
множество середин ребер области ограничений	19,25	19,52	20,51

Анализ полученных результатов показывает целесообразность сохранения методологии полного факторного планирования и ее отображения на границы области, в пределах которой наблюдения либо невозможны, либо мало информативны. При данном подходе малые размеры области ограничений показывают значения эффективности, соизмеримые с точностью полного факторного эксперимента. Наилучший результат наблюдается при использовании плана, который представляет собой множество угловых точек, множество середин ребер квадрата $-1 \leq x_i \leq +1$, ограничивающего пространство планирования, и множество середин ребер квадрата $-a \leq x_i \leq +a$, определяющего область ограничений.

Выполненные исследования показали целесообразность использования методологии полного факторного планирования при решении задач идентификации технических объектов и технологических процессов, имеющих ограничения на значения функции отклика. Предлагаемый подход к построению экспериментальных планов не ведет к значительному увеличению экспериментальных затрат и позволяет получить отдельные оценки регрессионных коэффициентов с сохранением достаточно высокой точности оценивания.

Библиографический список

1. Айвазян С.А. Основы эконометрики. – М., ЮНИТИ-ДАНА, 2001. - 432 с.
2. Вилисова Н.Т., Сидняев Н.И. Введение в теорию планирования эксперимента: учеб. пособие. - М., Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. - 463 с.

УДК 519.816 ; ГРНТИ 27.47.19

ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИЦИИ НЕЧЕТКИХ ОТОБРАЖЕНИЙ

В.Г. Чернов

Владимирский государственный университет имени А. Г. и Н.Г. Столетовых,
Российская Федерация, Владимир, vladimir.chernov44@mail.ru

Аннотация. Рассматривается метод решения задачи многокритериального выбора на основе композиции отображений, элементы которых, характеризующие степень соответствия между исходными параметрами, задаются в виде нечетких лингвистических утверждений.
Ключевые слова: нечеткое множество, функция принадлежности, нечеткое отображение, композиция отображений.

DECISION MAKING BASED ON COMPOSITION FUZZY MAPPINGS

V.G. Chernov

*Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov,
Russian Federation, Vladimir, vladimir.chernov44@mail.ru*

The summary. The method of solving the problem of multicriteria choice based on the composition of mappings whose elements characterizing the degree of correspondence between the initial parameters are set in the form of fuzzy linguistic statements is considered.

Key words: fuzzy set, belonging function, fuzzy mapping, composition of mappings.

Среди ситуаций, требующих принятия решений, достаточно часто встречаются такие, формальной моделью которых является наличие двух типов отображений

$$\Gamma_1 : F \rightarrow Q, \quad (1)$$

$$\Gamma_2 : A \rightarrow Q, \quad (2)$$

где $A = \{a_i : i = \overline{1, I}\}$ – множество альтернативных решений;

$F = \{f_j : j = \overline{1, J}\}$ – множество функций, выполнение которых должна обеспечить $\forall a_i \in A$;

$Q = \{q_k : k = \overline{1, K}\}$ – множество качеств, которые необходимы для выполнения $f_j \in F$ и которыми должны обладать альтернативы.

Конечное решение определяется композицией отображений Γ_1 и Γ_2

$$\Gamma_3 = (\Gamma_1, \Gamma_2).$$

Отображения (1) и (2) задаются матрицами $M_1(K \times J)$ и $M_2(I \times K)$, соответственно композиция $M_3 = M_1 \times M_2$.

В связи с тем, что установить четкое соответствие между компонентами соответствующих множеств достаточно затруднительно появились исследования по использованию нечетких отображений для задач принятия решений [1,2]. В этих работах элементы матриц M_1, M_2 нечеткие и задаются определяемыми экспертами значениями их функций принадлежности. Это означает, что если эксперт указал для некоторой пары (f_j, q_k) из M_1 значение $\mu_{f_j, q_k}(x) = 0.6$, то он уверен, что именно это значение будет иметь место. Тогда возникает вопрос, чем отличается этот подход от простого предложения оценивать степень соотношения между f_j и q_k числами из шкалы $[0,1]$ без заявления о нечеткости, т.е. нечеткость становится неявной.

Полное сохранение нечеткости будет, если элементами матриц M_1 и M_2 будут не числовые, а нечеткие лингвистические утверждения, например из терм-множества

$$T = \{\text{низкий уровень, ниже среднего, средний, выше среднего, высокий}\} =$$

$$\{l_n : n = \overline{1, N}\}, \quad (\text{В данном примере } N=5) \quad (3)$$

формализуемые нечеткими множествами с функциями принадлежности

$$\tilde{M}_T = \{\mu_{l_n}(x), n = \overline{1, 5}, x \in [0, 1]\}$$

Вид функций принадлежности выбирается без дополнительных ограничений исходя из объема априорной информации, которой располагает эксперт [3]. При формулировке задачи для обеих матриц M_1 и M_2 могут использоваться одни и те же терм множества, либо различные, например M_1 (3), для M_2

$$T' = \{\text{низкий, средний, высокий}\} = \{l_p : p = \overline{1,3}\},$$

$$\tilde{M}_{T'} = \{\mu_p(x), p = \overline{1,3}, x \in [0,1]\}.$$

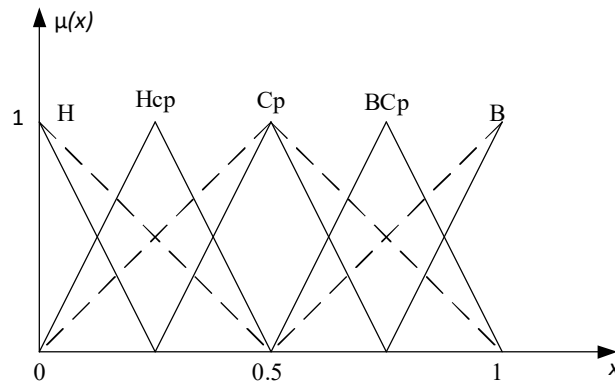


Рис. 1. Возможный вариант функций принадлежности

Треугольные функции принадлежности выбраны только из-за простоты графики. В результате матрицы M_1 и M_2 преобразуются в

$$\tilde{M}_1 = \|\tilde{m}_{k,j}^1\|, k = \overline{1,K}, j = \overline{1,J},$$

$$\tilde{M}_2 = \|\tilde{m}_{i,k}^2\|, k = \overline{1,K}, i = \overline{1,I},$$

где $\|\tilde{m}_{k,j}^1\| \in \tilde{M}_T, \|\tilde{m}_{i,k}^2\| \in \tilde{M}_T$. В таблицах 1 и 2 приведены примеры матриц \tilde{M}_1 и \tilde{M}_2 , если для них используются одинаковые оценки(3).

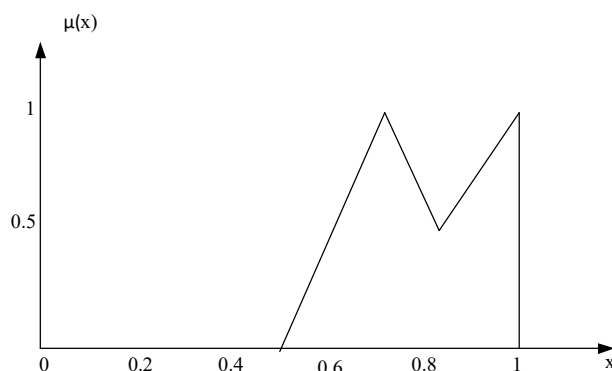
Таблица 1.Пример матрицы нечетких оценок \tilde{M}_1 .

\tilde{M}_1	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
C_1	В	В	BCp	HCp	Cp
C_2	BCp	Cp	В	HCp	Н
C_3	Cp	HCp	Cp	Cp	В
C_4	Cp	HCp	Cp	Cp	Н
C_5	BCp	BCp	Н	Cp	Cp

Таблица 2.Пример матрицы нечетких оценок \tilde{M}_2 .

\tilde{M}_2	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
a_1	В	BCp	BCp	В	В
a_2	BCp	HCp	BCp	Cp	Cp
a_3	Cp	Н	Н	BCp	BCp
a_4	Cp	В	Cp	BCp	HCp
a_5	В	Cp	Cp	BCp	HCp

Соответственно $\tilde{M}_3 = \tilde{M}_1 \times \tilde{M}_2 = \|\tilde{m}_3(a_i, f_j)\|$, элементы которой определяются по правилам минимаксной композиции. Элементы строк матрицы \tilde{M}_3 - это оценки соответствия альтернатив a_i функциям f_j , представленные нечеткими множествами $\tilde{m}(a_i, f_j)$ в общем случае с произвольными функциями принадлежности.

Рис. 2. Нечеткая оценка соответствия альтернативы a_1 функции f_4 .

Для окончательного решения необходимо каким-то образом сравнить элементы строк матрицы \tilde{M}_3 , соответствующие альтернативам, выбрав тем самым ту функцию, которой наилучшим образом соответствует данная альтернатива. Сравнение нечетких множеств с произвольными функциями принадлежности не тривиальная задача. Для ее решения можно использовать вычисление точечных значений, предложенных Р. Ягером[4], возможно также использование преобразования произвольного нечеткого множества в эквивалентное с треугольной функцией принадлежности[5], сравнение которых выполняется более просто. Однако оба эти метода предполагают дополнительные вычислительные процедуры.

Более простым является использование следующей оценки

$$\gamma = CG[\tilde{m}_3(a_i, f_j)] \mu\{CG[\tilde{m}_3(a_i, f_j)]\},$$

где $CG[\tilde{m}_3(a_i, f_j)]$ - координата центра тяжести нечеткого множества;

$\mu\{CG[\tilde{m}_3(a_i, f_j)]\}$ - значение функции принадлежности нечеткой оценки $\tilde{m}_3(a_i, f_j)$ в точке $CG[\tilde{m}_3(a_i, f_j)]$.

Логика этой оценки вполне очевидна, чем правее лежит значение $CG[\tilde{m}_3(a_i, f_j)]$, что можно интерпретировать как более высокую оценку соответствия альтернативы a_i условиям f_j , а значение $\mu\{CG[\tilde{m}_3(a_i, f_j)]\}$ - это оценка истинности соответствующего предположения. Тогда наиболее подходящей альтернативой для выполнения функции f_j будет альтернатива с наибольшим значением γ . В таблице 3 приведены результаты расчетов значений $\gamma(a_1, F)$, указывающие на то, что альтернатива a_1 будет наиболее подходящей для выполнения функции f_4 .

Таблица 3. Значения $\gamma(a_1, F)$.

F	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
$\gamma(a_1, F)$	0.44	0.09	0.34	0.65	0.31

Библиографический список

1. Drewniak J, Kula K. Generalized compositions of fuzzy relations.- International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems, 2016, V. 10, pp.149-163.
2. Guo F-F, Fu R., Shen J. Inverses of fuzzy relation matrices with addition-min composition.- Fuzzy Sets and Systems. 2024, V. 490, 15 August/ 2024.

3. Перат А. Нечеткое моделирование и управление: Пер. с англ. Изд. 2-е. М.:// БИНОМ. Лаборатория знаний. 2013. 798 с.
4. Yager R.R Multiple-objective decision - making using a fuzzy sets.- International Journal. Man - Machine.1977. № 4.
5. Чернов В.Г. Выбор решений в конфликтной ситуации с нечеткими типами участников// Искусственный интеллект и принятие решений. 2022.№ 4.с.24-43.

УДК 517.925; ГРНТИ 27.29.17

СОСТОЯНИЯ РАВНОВЕСИЯ ЧЕТЫРЕХФАКТОРНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РЫНКА ТРУДА С ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ФУНКЦИЕЙ КОББА – ДУГЛАСА

Е.Ю. Лискина, И.А. Силантьева

*Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина,
Российская Федерация, Рязань, katelis@yandex.ru, irinasilantevais@yandex.ru*

Аннотация. В статье исследуется четырехфакторная односекторная экономико-математическая модель рынка труда, учитывающая конкуренцию за ресурс рабочих мест и миграцию. Найдены состояния равновесия системы, исследована их устойчивость по первому приближению. Приведен численный пример.

Ключевые слова: дифференциальные уравнения, состояние равновесия, фазовая траектория, модель Солоу, односекторная экономическая модель, рынок труда.

EQUILIBRIUM POINTS OF THE FOUR-FACTOR DYNAMIC LABOR MARKET MODEL WITH THE COBB-DOUGLAS PRODUCTION FUNCTION

E.Y. Liskina, I.A. Silantjeva

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

Abstract. The article develops a four-factor single-sector economic and mathematical model of the labor market that takes into account competition for jobs and migration. The equilibrium states of the system are found, and their stability in the first approximation is investigated. A numerical example is given.

Keywords: differential equations, point of equilibrium, phase trajectory, Solow model, selected economic model, labor market.

Введение

В работах [1, 2] нами предложена автономная четырехфакторная динамическая модель рынка труда следующего вида:

$$\begin{cases} \dot{K} = -\mu K + (1-a)F(K, L), \\ \dot{L} = r_L Q \left(1 - \frac{Q}{M_L}\right), \\ \dot{N} = rN \left(1 - \frac{N}{M}\right), \\ \dot{Q} = \gamma_1 N + \gamma_2 F(K, L), \end{cases} \quad (1)$$

где K – капитал;

L – труд;

N – коренное население;

Q – рабочая сила;

$F(K, L)$ – производственная функция;

$(1-a) \in [0; 1)$ – коэффициент накопления основного капитала);

$\mu \in (0; 1)$ – норма амортизации, M_L и M – емкости региона по количеству рабочих мест и численности населения соответственно ($M > N$, $M_L > L$);

$\{r_L, r\} \in (-1; 1)$ – коэффициенты прироста рабочих мест и населения соответственно.

В уравнение для численности рабочей силы по аналогии с [3] введено влияние потребления на динамику рабочей силы в виде $\gamma_2 F(K, L)$, $\{\gamma_1, \gamma_2\} \in (-1, 1)$. Модель построена в условиях классического предположения о том, что экономика замкнута. Найденны состояния равновесия системы (1), исследовано поведение фазовых траекторий. В результате получено, что состояниями равновесия являются либо точки, содержащие хотя бы одну нулевую координату, а ненулевое по капиталу состояние равновесия содержит значения емкостей региона по труду и населению, т.е. в некотором смысле является критичным для сбалансированного функционирования экономики региона.

В работах [4, 5] было предложено рассматривать открытую экономику, учитывающую постоянные внешние инвестиции I и миграционное сальдо P :

$$\begin{cases} \dot{K} = -\mu K + (1-a)F(K, L) + I, \\ \dot{L} = r_L Q \left(1 - \frac{Q}{M_L}\right), \\ \dot{N} = rN \left(1 - \frac{N+P}{M}\right), \\ \dot{Q} = \gamma_1 N + \gamma_2 F(K, L) + \gamma_3 P. \end{cases} \quad (2)$$

При этом миграционное сальдо P может быть как положительной, так и отрицательной величиной); $\gamma_3 \in [0; 1)$ – коэффициент прироста рабочей силы за счет миграции. В статье [4] использовалась мультипликативная производственная функция вида $F(K, L) = \alpha_0 K L$ ($\alpha_0 > 0$ – коэффициент нейтрального научно-технического прогресса), которая не является вогнутой. В статье [5] рассматривалась система (2) с неоклассической производственной функцией вида $F(K, L) = \alpha_0 K^{\alpha_1} L^{\alpha_2}$, $\{\alpha_1, \alpha_2\} \in (0; 1)$, $\alpha_1 + \alpha_2 > 1$. В данном исследовании предлагается рассмотреть систему (2) с классической производственной функцией Кобба – Дугласа, т.е. $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$. С учетом ее система (2) приняла вид

$$\begin{cases} \dot{K} = -\mu K + (1-a)\alpha_0 K^{\alpha_1} L^{\alpha_2} + I, \\ \dot{L} = r_L Q \left(1 - \frac{Q}{M_L}\right), \\ \dot{N} = rN \left(1 - \frac{N+P}{M}\right), \\ \dot{Q} = \gamma_1 N + \gamma_2 \alpha_0 K^{\alpha_1} L^{\alpha_2} + \gamma_3 P. \end{cases} \quad (3)$$

Ставится задача: найти состояния равновесия системы (3), исследовать поведение траекторий в окрестности состояний равновесия методами качественной теории дифференциальных уравнений [6].

Исследование системы (3). Из условий $\dot{K} = \dot{L} = \dot{N} = \dot{Q}$ были получены состояния равновесия $O_1(K_1; L_1; 0; 0)$, $O_2(K_1; L_1; 0; M_L)$, $O_3(K_2; L_2; M - P; 0)$, $O_4(K_2; L_2; M - P; M_L)$,

$$K_1 = \frac{I\gamma_2 - (1-a)\gamma_3 P}{\mu\gamma_2}, L_1 = \left(-\frac{\gamma_3 P}{\gamma_2 \alpha_0} \left(\frac{\mu\gamma_2}{I\gamma_2 - (1-a)\gamma_3 P} \right)^{\alpha_1} \right)^{1/\alpha_2}, \quad (4)$$

$$K_2 = \frac{I\gamma_2 - (1-a)(\gamma_1(M-P) + \gamma_3 P)}{\mu\gamma_2}, L_2 = \left(-\frac{\gamma_1(M-P) + \gamma_3 P}{\gamma_2 \alpha_0} \left(\frac{\mu\gamma_2}{I\gamma_2 - (1-a)(\gamma_1(M-P) + \gamma_3 P)} \right)^{\alpha_1} \right)^{1/\alpha_2}. \quad (5)$$

Очевидно, что система (3) является моделью формальной экономики при условии $K_1 > 0, L_1 > 0, K_2 > 0, L_2 > 0$. Аналогично [5] доказаны следующие утверждения.

Утверждение 1. Для $K_1 > 0$ и $L_1 > 0$ необходимо и достаточно, чтобы выполнялось неравенство $P\gamma_2 < 0$.

Утверждение 2. Для $K_2 > 0$ и $L_2 > 0$ необходимо и достаточно выполнения одного (любого) из пяти условий:

- 1) $\gamma_1 > 0, \gamma_2 < 0, P < 0$;
- 2) $\gamma_1 < 0, \gamma_2 < 0, P > 0, |\gamma_1|(M-P) < \gamma_3 P$;
- 3) $\gamma_1 < 0, \gamma_2 > 0, P > 0, |\gamma_1|(M-P) > \gamma_3 P$;
- 4) $\gamma_1 < 0, \gamma_2 > 0, P < 0$;
- 5) $\gamma_1 > 0, \gamma_2 > 0, P < 0, |\gamma_1|(M-P) < \gamma_3 P$.

Замечание 1. При выполнении условий 2), или 4), или 5) утверждения 2 система (3) имеет четыре положительных состояния равновесия O_1, O_2, O_3, O_4 , а при выполнении условий 1) или 3) – только два (O_3 и O_4).

Поведение траекторий системы (2) в окрестности каждого из состояний равновесия O_1, O_2, O_3, O_4 определяется собственными значениями матрицы соответствующей системы линейного приближения [2]. Матрица системы линейного приближения в состоянии равновесия O_k ($k=1;4$) имеет вид

$$\begin{pmatrix} -\mu + (1-a)\alpha_0\alpha_1 K_j^{\alpha_1-1} L_j^{\alpha_2} & (1-a)\alpha_0\alpha_2 K_j^{\alpha_1} L_j^{\alpha_2-1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_L - \frac{2r_L Q^*}{M_L} \\ 0 & 0 & r\left(1 - \frac{P}{M}\right) - \frac{2rN^*}{M} & 0 \\ \gamma_2\alpha_0\alpha_1 K_j^{\alpha_1-1} L_j^{\alpha_2} & \gamma_2\alpha_0\alpha_2 K_j^{\alpha_1} L_j^{\alpha_2-1} & \gamma_1 & 0 \end{pmatrix}, \quad j=\overline{1;2}, \quad (6)$$

при этом $N^* \in \{0; M-P\}$, $Q^* \in \{0; M_L\}$, значения используются в соответствии с (4) и (5).

Обозначим $a_{11} = -\mu + (1-a)\alpha_0\alpha_1 K_j^{\alpha_1-1} L_j^{\alpha_2}$, $a_{12} = (1-a)\alpha_0\alpha_2 K_j^{\alpha_1} L_j^{\alpha_2-1}$, $a_{23} = r_L - \frac{2r_L Q^*}{M_L}$, $a_{33} = r\left(1 - \frac{P}{M}\right) - \frac{2rN^*}{M}$, $a_{41} = \gamma_2\alpha_0\alpha_1 K_j^{\alpha_1-1} L_j^{\alpha_2}$, $a_{42} = \gamma_2\alpha_0\alpha_2 K_j^{\alpha_1} L_j^{\alpha_2-1}$, $a_{43} = \gamma_1$. Тогда собственные значения матрицы (6) в окрестности особых точек O_1, O_2, O_3, O_4 определяются корнями соответствующего характеристического уравнения, которое имеет вид

$$(a_{33} - \lambda)((a_{11} - \lambda)(\lambda^2 - a_{42}a_{24}) + a_{41}a_{12}a_{24}) = 0. \quad (7)$$

Из вида уравнения (7) следует [7], что оно всегда имеет хотя бы два действительных собственных значения для каждой из особых точек O_1, O_2, O_3, O_4 .

С точки зрения экономической интерпретации наиболее привлекательным является состояние равновесия O_4 , так как оно соответствует экономике с ненулевыми численностями населения и рабочей силы, проживающей в этом регионе. Поэтому целесообразно подбирать параметры модели таким образом, чтобы точка O_4 была устойчивой или асимптотически устойчивой. Заметим, что для состояния равновесия O_4 при $N^* = M - P$ одно из собственных значений $\lambda = a_{33} = -r\left(1 - \frac{P}{M}\right)$ отрицательно при всех $r \in (0; 1)$. Поэтому можно исследовать вопрос устойчивости решений по части переменных.

Пример. Пусть система (3) имеет вид

$$\begin{cases} \dot{K} = -0,1K + (1-0,3)0,2K^{0,4}L^{0,6} + 50, \\ \dot{L} = 0,8Q\left(1 - \frac{Q}{10}\right), \\ \dot{N} = 0,007N\left(1 - \frac{N-7}{20}\right), \\ \dot{Q} = -0,04N + 0,3 \cdot 0,2K^{0,4}L^{0,6} - 0,5 \cdot 7. \end{cases} \quad (8)$$

Это означает, что в регионе наблюдается естественный прирост населения при убыли рабочей силы за счет естественных причин и за счет миграции. Система (8) удовлетворяет условию 4) утверждения 2, следовательно, система (8) имеет 4 особых точки. Их координаты и собственные значения соответствующих матриц линейного приближения (6) в окрестности каждой из особых точек O_1, O_2, O_3, O_4 представим в виде таблицы 1.

Таблица 1. Особые точки и собственные значения соответствующих матриц линейного приближения

Точка	Координаты	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4
O_1	(581,667; 12,592; 0; 0)	-0,100	-0,361	0,367	0,009
O_2	(581,667; 12,592; 0; 10)	-0,100	0,003+0,366i	0,003-0,366i	0,009
O_3	(606,867; 19,163; 27; 0)	-0,101	-0,334	0,341	-0,009
O_4	(606,867; 19,163; 27; 10)	-0,099	0,003+0,340i	0,003-0,340i	-0,009

Из таблицы 1 следует, что для всех особых точек системы (8) собственные значения матриц соответствующих систем линейного приближения имеют разные знаки, следовательно, состояния равновесия не являются устойчивыми по Ляпунову, однако, могут являться устойчивыми по некоторым координатам (этот вопрос требует дополнительного исследования).

Результаты численного моделирования поведения фазовых траекторий системы (8) представлены на рисунках 1–4. Производственная функция $F(K, L) = 0,2K^{0,4}L^{0,6}$ представлена на рисунке 1. Для построения фазовых траекторий выбраны начальные условия

$$\begin{aligned} & \{K(0) = 800,0; L(0) = 20,0; N(0) = 20,0; Q(0) = 8,0\}, \\ & \{K(0) = 800,0; L(0) = 20,0; N(0) = 10,0; Q(0) = 10,0\}, \\ & \{K(0) = 800,0; L(0) = 20,0; N(0) = 15,0; Q(0) = 12,0\}, \\ & \{K(0) = 300,0; L(0) = 20,0; N(0) = 20,0; Q(0) = 8,0\}, \\ & \{K(0) = 300,0; L(0) = 20,0; N(0) = 10,0; Q(0) = 10,0\}, \\ & \{K(0) = 300,0; L(0) = 20,0; N(0) = 15,0; Q(0) = 12,0\}. \end{aligned}$$

Промежуток времени для построения фазовых траекторий $t \in [0; 200]$. Поведение фазовых траекторий системы (8) представлено на рисунках 2–4. В системе координат $OLNQ$ (численность занятых, численность населения, численность рабочей силы) наблюдается устойчивое приближение к состоянию равновесия O_4 . В других тройках координат фазового пространства траектории неустойчивы.

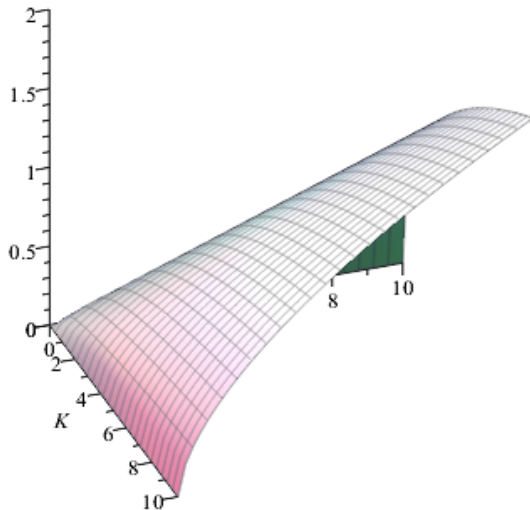


Рис. 1. Производственная функция
 $F(K, L) = 0,2K^{0,4}L^{0,6}$

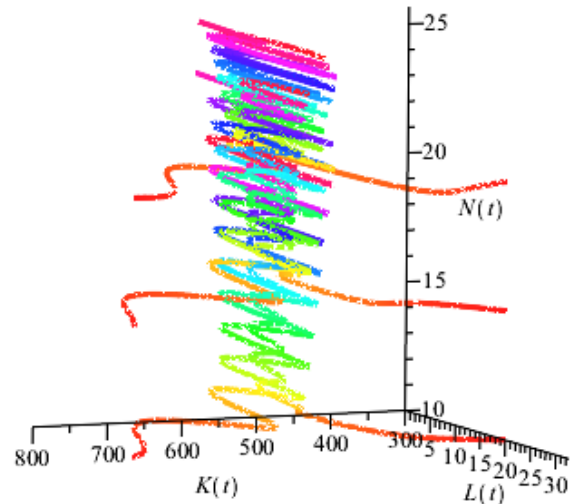


Рис. 2. Фазовые траектории системы (8)
 в координатах $OKLN$

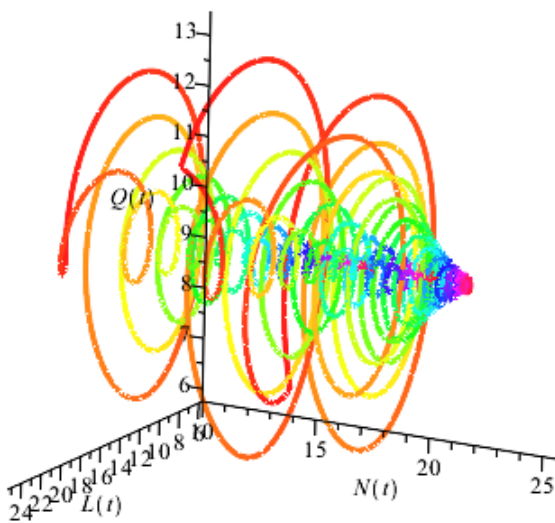


Рис. 3. Фазовые траектории системы (8)
 в координатах $OLNQ$

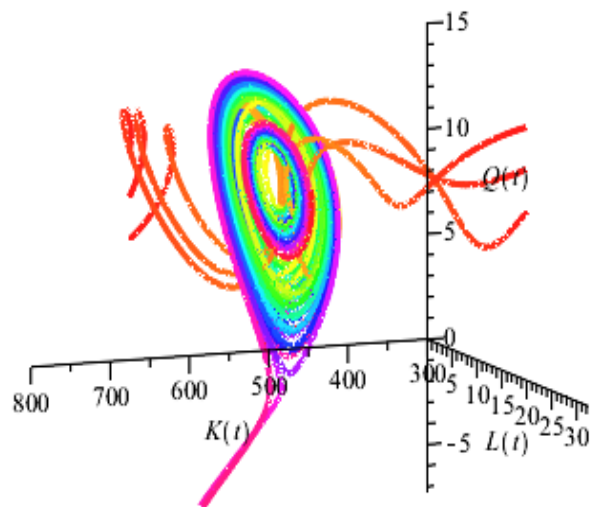


Рис. 4. Фазовые траектории системы (8)
 в координатах $OKLQ$

Заключение

Дальнейшее исследование системы (3) предполагает изучение влияния внешних параметров – внешних инвестиций I , миграционного сальдо P , нормы накопления основного капитала $(1-a)$, на поведение траекторий системы (3) и на устойчивость состояния равновесия O_4 . Также предполагается рассмотреть ряд оптимизационных задач.

Библиографический список

1. Лискина Е.Ю. Построение динамической модели рынка труда некоторого региона на основе односекторной модели экономики кейнсианского типа / Е.Ю. Лискина // Некоторые вопросы анализа, алгебры, геометрии и математического образования. – 2016. – № 5-1. – С. 182–183.
2. Лискина Е.Ю. Исследование состояний равновесия динамической модели рынка труда некоторого региона / Е.Ю. Лискина, И.П. Шукина // . Некоторые вопросы анализа, алгебры, геометрии и математического образования. – 2018. – № 8. – С. 198–199.
3. Абрамов В.В. Стационарные состояния в модели односекторной экономики / В.В. Абрамов // Дифференциальные уравнения и математическое моделирование : межвуз. сб. науч. тр. – Вып. 2. – Рязань : Ряз. гос. ун-т имени С. А. Есенина, 2021. – С. 4–9.
4. Лискина Е.Ю. Исследование равновесных траекторий неавтономной динамической модели рынка труда / Е.Ю. Лискина, И.А. Силантьева // Системы управления, сложные системы: моделирование, устойчивость, стабилизация, интеллектуальные технологии: материалы IX Междунар. науч.-прак. конф. Елец: Елецкий гос. ун-т им. И.А. Бунина, 2023. С. 84–88.
5. Лискина Е.Ю. Исследование четырехфакторной динамической модели рынка труда с мультипликативной производственной функцией/ Е.Ю. Лискина, И.А. Силантьева // Математика и естественные науки. Теория и практика: Межвуз. сб. науч. тр. Вып. 19. – Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2024. – С. 138–144.
6. Баутин Н.Н., Леонтович Е.А. Методы и приемы качественного исследования динамических систем на плоскости. – М.: Наука, 1991. – 486 с.
7. Курош А.Г. Курс высшей алгебры / А.Г. Курош. – М.: Наука, ГИФМЛ, 1968. – 431 с.

УДК 517.925.52; ГРНТИ 27.29.17

К ПРОБЛЕМЕ ПОВЕДЕНИЯ РЕШЕНИЙ СИСТЕМЫ ОБЫКНОВЕННЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ В ОКРЕСТНОСТИ БЕСКОНЕЧНОСТИ ФАЗОВОГО ПРОСТРАНСТВА

И.М. Купцов^{1,2}, В.В. Абрамов¹

¹ Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина,
Россия, Рязань, kuptsov.im@gmail.com, abramov.vladimir.1971@mail.ru,

² Яндекс,

Россия, Москва, kuptsov.im@gmail.com

Аннотация. Исследована нормальная система обыкновенных дифференциальных уравнений. Предполагается, что правая часть системы периодична по независимой переменной, имеет в окрестности бесконечности фазового пространства критическое линейное приближение и допускает выделение однородного первого нелинейного приближения. Устойчивость бесконечности определено по свойству степеней оператора монодромии. Первое нелинейное приближение оператора монодромии определено в результате усреднения на периоде первого нелинейного приближения правой части на решениях соответствующей линейной однородной системы. По свойству оценки нормы первого нелинейного приближения оператора монодромии получен достаточный признак асимптотической устойчивости бесконечности фазового пространства.

Ключевые слова: система дифференциальных уравнений, асимптотическая устойчивость, оператор монодромии, фазовое пространство.

ON THE PROBLEM OF THE BEHAVIOR OF SOLUTIONS OF A SYSTEM OF ORDINARY DIFFERENTIAL EQUATIONS IN THE VICINITY OF INFINITY OF PHASE SPACE

I.M. Kuptsov^{1,2}, V.V. Abramov¹

¹ Ryazan State University named after S.A. Yesenin,
Russia, Ryazan, kuptsov.im@gmail.com, abramov.vladimir.1971@mail.ru,

² Yandex,

Russia, Moscow, kuptsov.im@gmail.com

The summary. The normal system of ordinary differential equations is investigated. It is assumed that the right-hand side of the system is periodic in the independent variable, has a critical linear approximation in the vicinity of infinity of the phase space, and allows for the selection of a ho-

homogeneous first nonlinear approximation. The stability of infinity is determined by the property of degrees of the monodromy operator. The first nonlinear approximation of the monodromy operator is determined as a result of averaging over the period of the first nonlinear approximation of the right-hand side on solutions of the corresponding linear homogeneous system. By the property of estimating the norm of the first nonlinear approximation of the monodromy operator, a sufficient sign of the asymptotic stability of the infinity of the phase space is obtained.

Keywords: system of differential equations, asymptotic stability, monodromy operator, phase space.

Введение

В качественной теории обыкновенных дифференциальных уравнений наиболее исследованы локальные проблемы, которые относятся к свойствам интегральных кривых (или траекторий) в окрестностях определенных программных движений, к частности стационарных или периодических движений. При этом предполагается, что главную роль в исследовании играет некоторое первое приближение системы дифференциальных уравнений, например, линейное приближение или, в критических случаях, нелинейное приближение с наименьшей степенью. В работах [1–7] аналогичная идея развита в связи с исследованием решений в окрестности бесконечности фазового пространства. В частности, получены результаты по ветвлению периодического решения от бесконечности. В работе [8] такое явление названо бифуркацией Андронова–Хопфа от бесконечности по аналогии с локальным случаем. Локальная бифуркация цикла от особой точки связана с «мягким» режимом возникновения колебаний, а ветвление цикла от бесконечности – один из вариантов «жесткого» режима возникновения колебаний. При этом естественно возникает задача об условиях наличия свойства асимптотической устойчивости бесконечности, так как траектория ограниченного решения, возникающего в результате ветвления, расположена вне области асимптотической устойчивости. Кроме того, задача об устойчивости бесконечности фазового пространства связана с исследованием ограниченности решений системы дифференциальных уравнений, которое, по сути, означает отделённость траекторий решений от бесконечности.

Постановка задачи

Допустим, рассматривается система обыкновенных дифференциальных уравнений

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

для которой $t \in I$, I – неограниченный справа промежуток, $x \in R^n$ – фазовая переменная, $\mu \in M$ – вещественный или векторный постоянный параметр (в частности, малый параметр), свойства вектор-функции $g(t, x, \mu)$ обеспечивают единственность и продолжаемость на I любого решения с начальным значением, имеющим достаточно большую норму.

Пусть далее $\|\cdot\|$ – произвольно выбранная матричная норма и согласованная с ней векторная норма в R^n .

Определение 1. Для системы вида (1) бесконечность фазового пространства асимптотически устойчива, если для любых $t_0 \in I$, $\mu \in M$, $\varepsilon > 0$ существует число $\delta > 0$, при котором из оценки $\|x(t_0, \mu)\| > \delta$ для начального значения следует, что для всех $t \in I$, $t > t_0$ имеет место оценка возмущения $\|x(t, \mu)\| > \varepsilon$ для решения и выполняется условие притяжения $\lim_{t \rightarrow +\infty} \|x(t, \mu)\| = +\infty$.

Далее рассмотрим систему вида (1), для которой выполняются условия:

$$\begin{aligned} \forall t \in I = [0, +\infty) : g(t + \omega, x, \mu) &= g(t, x, \mu); \\ g(t, x, \mu) &= A(t)x + f(t, x, \mu); \\ \lim_{\alpha \rightarrow 0+0} \alpha^{-s} \|f(t, x/\alpha, \mu)\| &\equiv 0, \quad s > 0. \end{aligned} \quad (2)$$

(Заметим, что равенство типа « $\equiv 0$ » для предела означает здесь и далее равномерность относительно всех аргументов кроме того, для которого реализуется предельный переход.)

Как известно [9], свойство устойчивости ляпуновского типа (свойство, определенное в терминах оценки норм возмущений решений) для автономных и периодических систем является равномерным относительно выбора начального значения независимой переменной нормальной системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Поэтому для системы (1)–(2) в определении 1 достаточно выбрать $t_0 = 0$. Далее обозначим $x(t, a, \mu)$ решение с начальным значением $x(0, a, \mu) = a$. Если норма фазовой переменной достаточно велика, то система (1)–(2) сколь угодно близка к линейной $\dot{x} = A(t)x$. При этом ее решения $x(t, a, \mu)$ определены, по крайней мере, при $t \in [0, \omega]$, то есть определен оператор монодромии $a \rightarrow x(\omega, a, \mu)$ (оператор сдвига вдоль траекторий на период). В силу периодичности (2) устойчивость по определению 1 можно сформулировать в следующей равносильной форме с помощью оценок норм степеней оператора монодромии на основе группового свойства динамической системы. Доказательство равносильности проводится так же, как и доказательство леммы 9.1 [10].

Определение 2. Для системы (1)–(2) бесконечность фазового пространства асимптотически устойчива, если для любых $\mu \in M$ и $\varepsilon > 0$ существует число $\delta > 0$, при котором из оценки $\|a\| > \delta$ следует, что для всех $m \in N$ имеет место оценка $\|x(m\omega, a, \mu)\| > \varepsilon$ и выполняется условие $\lim_{m \rightarrow +\infty} \|x(m\omega, a, \mu)\| = +\infty$.

Задача. Получить признак асимптотической устойчивости по определению 2 для системы (1)–(2) по свойствам первого нелинейного приближения правой части.

Основной результат

Пусть $X(t)$ – фундаментальная матрица системы $\dot{x} = A(t)x$, нормированная условием $X(0) = E$. Допустим, матрицы монодромии $X_{\pm} = X(\pm\omega)$ имеют спектральный радиус 1, то есть в задаче об устойчивости для системы (1)–(2) по линейному приближению место критический случай. Предположим также, что при условии (2) имеет место разложение

$$f(t, x, \mu) = f_1(t, x, \mu) + f_2(t, x, \mu), \quad (3)$$

в котором вектор-функция $f_1(t, x, \mu)$: 1) рассматривается в качестве первого нелинейного приближения правой части системы (1)–(2) в силу условия $\lim_{\|x\| \rightarrow +\infty} \|f_2(t, x, \mu)\| / \|f_1(t, x, \mu)\| \equiv 0$;

2) обладает однородностью, то есть $f_1(t, \alpha x, \mu) = \alpha^k f_1(t, x, \mu)$ при $k \in (0, 1)$ для любого $\alpha \in R$; 3) не аннулируется при усреднении на периоде вдоль решений системы $\dot{x} = A(t)x$, то

есть выполняется условие $p(a, \mu) = X_- \int_0^{-\omega} X^{-1}(t) f_1(t, X(t)a, \mu) dt \neq 0_n$.

В силу разложения (3) для системы (1)–(2) в окрестности бесконечности фазового пространства левый оператор монодромии имеет вид

$$x(-\omega, a, \mu) = X_- + p(a, \mu) + \varphi(a, \mu), \quad (4)$$

где вектор-функция $\varphi(a, \mu) = X_- \int_0^{-\omega} X^{-1}(t) f(t, x(t, a, \mu), \mu) dt - p(a, \mu)$ удовлетворяет условию

$$\lim_{\alpha \rightarrow \infty} \alpha^{-k} \|\varphi(\alpha x, \mu)\| \equiv 0.$$

Допустим, для любых $\sigma \in R^n : \|\sigma\| = 1$, $\mu \in M$ и любого достаточно малого числа $\gamma > 0$ при некотором способе нормировки для матрицы $P(a, \mu) = \frac{1}{k} p'_a(a, \mu)$ имеет место оценка

$$\|X_- + \gamma P(\sigma, \mu)\| \leq 1 - b\gamma, \quad b > 0. \quad (5)$$

Теорема. Если выполняются условия (3), (4), (5), то для для системы (1)–(2) бесконечность фазового пространства асимптотически устойчива.

Доказательство. Рассмотрим для левого оператора монодромии последовательность степеней $a(m) = x(-m\omega, a, \mu)$, $m \in N$, определяемую системой (1). Из группового свойства решений $x(-(m+1)\omega, a, \mu) = x(-\omega, x(-m\omega, a, \mu), \mu)$ периодической динамической системы [11] и из равенства (2) следует, что последовательность $a(m)$ является решением рекуррентной системы уравнений $a(m+1) = (X_- + P(a(m), \mu))a(m) + \varphi(a(m), \mu)$. Произвольно выберем $\mu \in M$. Допустим, для некоторого $m \in N$ выполняется неравенство $\|a(m)\| > \delta_1$, где $\delta_1 > 0$ – некоторое достаточно большое число. Тогда в силу условий (3) и (5) имеют место оценки:

$$\|X_- + \|a(m)\|^{k-1} P(a(m) / \|a(m)\|, \mu)\| \leq 1 - b \|a(m)\|^{k-1}, \quad \|\varphi(a(m), \mu)\| \leq \|a(m)\|^{k-1} b / 2. \quad (6)$$

Из разложения (4) и оценок (6) следует неравенство

$$\|a(m+1)\| \leq (1 - \|a(m)\|^{k-1} b / 2) \|a(m)\|. \quad (7)$$

Из неравенства (7) следует, что выполняется условие

$$\|a(m+1)\| (1 + \|a(m+1)\|^{k-1} b / 2) \leq \|a(m)\|. \quad (8)$$

Теперь рассмотрим последовательность степеней $c(m) = x(m\omega, a, \mu)$ правого оператора монодромии. Величины $c(m)$ с достаточно большими нормами определены при всех $m \in N$. Действительно, если при некотором $m \in N$ выполняется неравенство $\|a(m)\| > \delta_1$, то в силу неравенства (7) имеет место оценка $\|a(m+1)\| < \|a(m)\|$. То есть при достаточно больших нормах начальных значений последовательности $a(m)$ ограничены, а, значит, определены при всех $m \in N$. Следовательно, такой же вывод верен и для последовательности значений $c(m)$, так как если $c(m) = a(m+1)$, то $c(m+1) = a(m)$ по групповому свойству решений системы (1). В силу условия (8) при любом $\mu \in M$ из неравенства $\|c(m)\| > \delta_1$ следует оценка

$$\|c(m)\| (1 + \|c(m)\|^{k-1} b / 2) \leq \|c(m+1)\|. \quad (9)$$

Итак, произвольно выберем большое число $\varepsilon > 0$ и значение параметра $\mu \in M$. Тогда из условия $\|a\| > \delta$, в котором $\delta = \max\{\varepsilon, \delta_1\}$ по индукции в силу оценки (9) для любого $m \in N$ получим неравенство $\|x(m\omega, a, \mu)\| > \varepsilon$. Далее, рассматривая тождественную последовательность значений функции Ляпунова вида $V_j(u) \equiv \|u\|$, по аналогии с доказательством предложения 2 из книги [12] получим, что выполняется условие притяжения $\lim_{m \rightarrow +\infty} \|x(m\omega, a, \mu)\| = +\infty$. Значит, для системы (1)–(2) имеет место устойчивость по определению 2. Теорема доказана.

Библиографический список

1. Абрамов, В.В. О ветвлении малых и больших периодических решений квазилинейных систем обыкновенных дифференциальных уравнений / В.В. Абрамов // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2022: сборник трудов V Международного научно-технического форума в 10-ти томах / под общ. ред. О.В. Миловзорова. – Рязань, 2022. – Т. 5. – С. 5–11.
2. Abramov, V.V. On the branching of a large periodic solution of a system of differential equations with a parameter / V.V. Abramov // Journal of Mathematical Sciences. – 2022. – V. 262, № 6. – P. 767–772.
3. Абрамов, В.В. Об устойчивости бесконечности для системы дифференциальных уравнений / В.В. Абрамов // Системы управления, сложные системы: моделирование, устойчивость, стабилизация, интеллектуальные технологии: материалы IX Международной научно-практической конференции. – Елец, 2023. – С. 34–37.
4. Abramov, V.V. Aspects of mathematical modeling of complex processes realized in combined onboard system / V.V. Abramov, I.M. Kupstov, S.L. Yablochnikov, K.V. Bukhensky // 2024 Systems of signals generating and processing in the field of on board communications. – Publisher: IEEE, 2024. – Pp. 1-6. – DOI: 10.1109/IEEECONF60226.2024.10496727.
5. Купцов, И.М. О ветвлении большого цикла автономной системы / И.М. Купцов, В.В. Абрамов В.В. // Дифференциальные уравнения и математическое моделирование. – 2024, вып. 6. – С. 71–72.
6. Абрамов, В.В. Ветвление инвариантного множества системы дифференциальных уравнений с малым параметром / В.В. Абрамов // Дифференциальные уравнения и математическое моделирование. – 2024, вып. 5. – С. 71–72.
7. Купцов, И.М. Применение теории больших решений обыкновенных дифференциальных уравнений к моделированию динамики инфекционных заболеваний и распространения информации / И.М. Купцов // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2024: сборник трудов VII Международного научно-технического форума в 10-ти томах. – Рязань, 2024. – Т. 5. – С. 54–58.
8. Красносельский, А.М. Вырожденный случай бифуркации Андронова–Хопфа на бесконечности / А.М. Красносельский // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 11. – С. 55–68.
9. Руш, Н. Прямой метод Ляпунова в теории устойчивости / Н. Руш, П. Абетс, М. Лалуа // М.: Мир. – 1980.
10. Красносельский, М.А. Оператор сдвига по траекториям дифференциальных уравнений / М.А. Красносельский // М.: Наука. – 1966.
11. Зубов, В.И. Теория колебаний / В.И. Зубов // М.: Высшая школа. – 1979.
12. Халанай А. Качественная теория импульсных систем / А. Халанай, Д. Векслер // М.: Мир. – 1971.

УДК 517.925.41; 330.4

К ПРОБЛЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОДНОСЕКТОРНОЙ ЭКОНОМИКИ

^{1,2} Д.В. Юдин, ¹ В.В. Абрамов

¹ Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина,

² ПАО завод «Красное знамя»,

Российская Федерация, Рязань, dmitriy.yudin.2001@mail.ru, abramov.vladimir.1971@mail.ru

Аннотация. В данной работе анализируется двухфакторная модель односекторной экономики с непрерывным временным горизонтом. Предполагается, что производственная функция принимает отрицательные значения при достаточно высоких уровнях факторов производства. Динамика этих факторов определяется как инвестициями в них, так и естественным процессом их убыли. Выведены условия для параметров модели, при которых экономика может функционировать в устойчивом стационарном режиме.

Ключевые слова: ограниченная односекторная экономика, система дифференциальных уравнений, положение равновесия, устойчивость.

ON THE PROBLEM OF SINGLE-SECTOR ECONOMY RESEARCH

^{1,2} D.V. Yudin, ¹ V.V. Abramov

¹ Ryazan State University named after S.A. Yesenin,

² PJSC factory «Krasnoe Znamya»,

Russia, Ryazan, dmitriy.yudin.2001@mail.ru, abramov.vladimir.1971@mail.ru

The summary. This paper analyzes a two-factor model of a single-sector economy with a continuous time horizon. It is assumed that the production function takes on negative values at sufficiently high levels of production factors. The dynamics of these factors is determined both by investments

in them and by the natural process of their loss. The conditions for the parameters of the model are derived, under which the economy can function in a stable stationary mode.

Keywords: limited single-sector economy, system of differential equations, equilibrium position, stability.

Рассмотрим двухфакторную модель односекторной экономики, предложенную в качестве модификации модели Солоу в работах [1–3],

$$\begin{cases} \dot{K} = P(K, L) = -\mu K + \lambda_1 F, \\ \dot{L} = Q(K, L) = -\nu L + a(\lambda_1 F)^s, \end{cases} \quad (1)$$

где фонды K и труд L – факторы производства;

$F = F(K, L)$ – производственная функция;

$\mu \in (0, 1)$ – норма амортизации;

$\nu > 0$ – коэффициент естественного прироста труда;

λ_1, λ_2 – нормы инвестиций, $\lambda_1 + \lambda_2 \in (0, 1]$, $a > 0$ – коэффициент зависимости прироста L от функции инвестиций;

$s > 0$ – эластичность прироста L по инвестициям.

Заметим, что в модели (1) предполагается, что поддержание величины труда при ее естественной убыли обеспечивается за счет инвестиций в наращение труда.

В отличие от традиционного подхода, когда модель экономики используется для изучения роста, исследуем модель (1) при слабо изученном условии ограниченности экономики, которое будем ассоциировать с отрицательностью производственной функции при больших объёмах факторов. Допустим, в модели (1) производственная функция

$$F(K, L) = AK^{\alpha_1} L^{\beta_1} (1 - BK^{\alpha_2} - CL^{\beta_2}), \quad (2)$$

где $\alpha_2 > \alpha_1 > 0$, $\beta_2 > \beta_1 > 0$ – показатели эластичности по фондам и труду соответственно, A, B, C – положительные коэффициенты.

Для обеспечения долгосрочного функционирования экономики с положительным выпуском, ставится **задача** поиска соотношений для параметров, при которых система (1)–(2) имеет устойчивое ненулевое положение равновесия факторов производства. Если эта задача разрешима, то будем говорить **модель экономики продуктивна**.

Равновесия системы (1) определяются точками пересечения изоклин

$$\begin{cases} -\mu K + \lambda_1 F = 0, \\ -\nu L + a(\lambda_1 F)^s = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Из первого уравнения системы (3) получим $F = \frac{\mu K}{\lambda_1}$, подставим во второе уравнение и

выразим переменную L

$$L = hK^s, \quad h = \frac{a}{\nu} \left(\frac{\lambda_2 \mu}{\lambda_1} \right)^s. \quad (4)$$

Равенство (4) определяет линию, на которой могут лежать положения равновесия системы (1). С учётом соотношений (2)–(4) составим уравнение для абсциссы K ненулевого положения равновесия системы (1)

$$f(K) = \lambda_1 A h^{\beta_1} K^{\alpha_1 + s\beta_1 - 1} (1 - BK^{\alpha_2} - Ch^{\beta_2} K^{s\beta_2}) - \mu = 0. \quad (5)$$

Оценим количество решений уравнения (5). Найдем $f'(K) = \lambda_1 A h^{\beta_1} K^{\alpha_1 + s\beta_1 - 2} g(K)$, где $g(K) = (\alpha_1 + s\beta_1 - 1) - (\alpha_1 + \alpha_2 + s\beta_1 - 1)BK^{\alpha_2} - (\alpha_1 + s\beta_1 + s\beta_2 - 1)Ch^{\beta_2} K^{s\beta_2}$. Для $g(K)$ возможны

следующие варианты. Если $\alpha_2 \neq s\beta_2$, то $g'(K) < 0$. В таком случае, уравнение $g(K) = 0$ имеет не более одного корня, при этом выполняются условия $\lim_{K \rightarrow 0+0} g(K) = (\alpha_1 + s\beta_1 - 1)$ и $\lim_{K \rightarrow +\infty} g(K) = -\infty$. Значит, существует единственное значение K_0 , такое, что $g(K_0) = 0$.

При этом K_0 – точка глобального максимума $f(K)$ при $K > 0$. Если $\alpha_2 = s\beta_2$, то $g(K) = (\alpha_1 + s\beta_1 - 1) - (\alpha_1 + \alpha_2 + s\beta_1 - 1)K^{\alpha_2}(B + Ch^{\beta_2})$. Из условия $g(K) = 0$ найдём точку

$$K_0 = \left(\frac{(\alpha_1 + s\beta_1 - 1)}{(\alpha_1 + \alpha_2 + s\beta_1 - 1)(B + Ch^{\beta_2})} \right)^{\frac{1}{\alpha_2}}$$
 глобального максимума $f(K)$ при $K > 0$.

Далее будем предполагать, что выполняется условие $f(K_0) > 0$. При этом уравнение (5) имеет два положительных решения $K_1 \in (0, K_0)$, $K_2 \in (K_0, +\infty)$. Тогда с учетом равенства (4) система (1)–(2) имеет два ненулевых положения равновесия (K_1, L_1) , (K_2, L_2) .

Исследуем устойчивость обнаруженных положений равновесия. Составим матрицу коэффициентов системы в вариациях $V = \begin{pmatrix} P'_K & P'_L \\ Q'_K & Q'_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\mu + \lambda_1 F'_K & \lambda_1 F'_L \\ as\lambda_2(\lambda_2 F)^{s-1} F'_K & -v + as\lambda_2(\lambda_2 F)^{s-1} F'_L \end{pmatrix}$.

Оценим знаки следа и определителя этой матрицы в каждом положении равновесия (K_1, L_1) , (K_2, L_2) . С учетом соотношений (4) и равенства $F = \frac{\mu K}{\lambda_1}$ вычислим маргинальные величины производственной функции по факторам производства:

$$\begin{aligned} F'_K &= AL^{\beta_1}(\alpha_1 K^{\alpha_1-1} - B(\alpha_1 + \alpha_2)K^{\alpha_1+\alpha_2-1} - C\alpha_1 K^{\alpha_1-1}L^{\beta_2}) = \\ &= AK^{\alpha_1-1}L^{\beta_1}(\alpha_1 - B(\alpha_1 + \alpha_2)K^{\alpha_2} - C\alpha_1 L^{\beta_2}) = \\ &= \alpha_1 \frac{F}{K} - \alpha_2 ABK^{\alpha_1+\alpha_2-1}L^{\beta_1} = \alpha_1 \frac{\mu}{\lambda_1} - \alpha_2 ABh^{\beta_1} K^{\alpha_1+\alpha_2+s\beta_1-1}; \\ F'_L &= AK^{\alpha_1}L^{\beta_1}(\beta_1 L^{\beta_1-1} - B\beta_1 K^{\alpha_2}L^{\beta_1-1} - C(\beta_1 + \beta_2)L^{\beta_1+\beta_2-1}) = \\ &= AK^{\alpha_1}L^{\beta_1-1}(\beta_1 - B\beta_1 K^{\alpha_2} - C(\beta_1 + \beta_2)L^{\beta_2}) = \\ &= \beta_1 \frac{F}{L} - \beta_2 ACK^{\alpha_1}L^{\beta_1+\beta_2-1} = \beta_1 \frac{\mu}{\lambda_1} h^{-1}K^{1-s} - \beta_2 ACh^{\beta_1+\beta_2-1} K^{\alpha_1+s(\beta_1+\beta_2-1)}. \end{aligned}$$

Из системы (3) получим соотношение $as\lambda_2(\lambda_2 F)^{s-1} = as \frac{(\lambda_2 F)^s}{F} = as \left(\frac{v}{a} \right) \frac{\lambda_1}{\mu} \frac{L}{K} = \frac{sv\lambda_1}{\mu} hK^{s-1}$. Тогда след матрицы V имеет следующее значение

$$\begin{aligned} trV &= -\mu + \lambda_1 F'_K - v + as\lambda_2(\lambda_2 F)^{s-1} F'_L = \\ &= -\mu - v + \lambda_1 \left(\alpha_1 \frac{\mu}{\lambda_1} - \alpha_2 ABh^{\beta_1} K^{\alpha_1+\alpha_2+s\beta_1-1} \right) + \frac{sv\lambda_1}{\mu} hK^{s-1} \left(\beta_1 \frac{\mu}{\lambda_1} h^{-1}K^{1-s} - \beta_2 ACh^{\beta_1+\beta_2-1} K^{\alpha_1+s(\beta_1+\beta_2-1)} \right) = \\ &= -\mu - v + \alpha_1 \mu + sv\beta_1 - \lambda_1 Ah^{\beta_1} K^{\alpha_1+s\beta_1-1} \left(\alpha_2 BK^{\alpha_2} + \frac{sv\beta_2}{\mu} CK^{s\beta_2} \right). \end{aligned}$$

Допустим, выполняется оценка

$$\mu(\alpha_1 - 1) + v(1 - s\beta_1) < 0. \quad (6)$$

Итак, для обоих положений равновесия системы (1) выполняется условие $trV < 0$. Вычислим определитель матрицы V :

$$\begin{aligned}
\det V &= \mu\nu - \mu a s \lambda_2 (\lambda_2 F)^{s-1} F'_L - \lambda_1 F'_K \nu = \\
&= \mu\nu - \mu \frac{s\nu\lambda_1}{\mu} h K^{s-1} \left(\beta_1 \frac{\mu}{\lambda_1} h^{-1} K^{1-s} - \beta_2 A C h^{\beta_1+\beta_2-1} K^{\alpha_1+s(\beta_1+\beta_2-1)} \right) - \lambda_1 \nu \left(\alpha_1 \frac{\mu}{\lambda_1} - \alpha_2 A B h^{\beta_1} K^{\alpha_1+\alpha_2+s\beta_1-1} \right) = \\
&= \mu\nu - s\nu\beta_1 - \mu\nu\alpha_1 + s\nu\lambda_1\beta_2 A C h^{\beta_1+\beta_2} K^{\alpha_1+s\beta_1+s\beta_2-1} + \lambda_1\nu\alpha_2 A B h^{\beta_1} K^{\alpha_1+\alpha_2+s\beta_1-1} = \\
&= \mu\nu(1-\alpha_1-s\beta_1) + \lambda_1\nu A h^{\beta_1} K^{\alpha_1+s\beta_1-1} (s\beta_2 h^{\beta_2} K^{s\beta_2} + \alpha_2 B K^{\alpha_2}).
\end{aligned}$$

Допустим, при значении K_0 , найденном выше из условия $g(K_0) = 0$, справедлива оценка

$$\det V_0 = \mu\nu(1-\alpha_1-s\beta_1) + \lambda_1\nu A h^{\beta_1} K_0^{\alpha_1+s\beta_1-1} (s\beta_2 h^{\beta_2} K_0^{s\beta_2} + \alpha_2 B K_0^{\alpha_2}) \geq 0. \quad (7)$$

Очевидно, что величина $\det V$ строго возрастает с ростом K , так как $(\det V)'_K > 0$. Тогда при условиях (6), (7) для положения равновесия (K_2, L_2) , $K_2 \in (K_0, +\infty)$ выполняются условия $\text{tr} V < 0$, $\det V > 0$, при которых по теореме Виета для матрицы V оба собственных значения имеют отрицательные вещественные части. Значит, (K_2, L_2) – устойчивое положение равновесия. (Ему соответствует устойчивая особая точка типа «узел» или «фокус»).

Таким образом, справедливо следующее утверждение.

Теорема. Если для экзогенных параметров односекторной ограниченной экономики выполняются условия (6), (7), то модель (1)–(2) продуктивна.

Пример. Рассмотрим модель (1)–(2) с формально заданными значениями:

- 1) показатели эластичности: $\alpha_1 = 2/3$, $\alpha_2 = 2$, $\beta_1 = 4/3$, $\beta_2 = 2$, $s = 1$;
- 2) коэффициенты приращения факторов производства: $\mu = 0.01$, $\nu = 0.05$, $a = 0.3$;
- 3) коэффициенты производственной функции: $A = 80$, $B = 15$, $C = 5$;
- 4) нормы инвестиций: $\lambda_1 = 0.1$, $\lambda_2 = 0.2$.

Для вычислений и графических построений при исследовании здесь применен пакет компьютерной алгебры Maple/

Расположения семейства изоквант производственной функции показано на рисунке 1.

Для модели с указанными параметрами выполняются условия установленной выше теоремы. В частности, $f(K_0) = 0.03695$. При этом $f(K) = 0.4735K(1 - 15.36K^2) - 0.01$ – вид функции в левой части уравнения (5), ее график представлен на рисунке 2. Система (1)–(2) в данном случае имеет два ненулевых положения равновесия: $(K_1, L_1) = (0.0213, 0.0026)$ – положение равновесия типа «седло», $(K_2, L_2) = (0.2463, 0.0296)$ – устойчивое положение равновесия типа «узел». Заметим, что численные эксперименты в широком диапазоне допустимых значений коэффициентов показывают, что такие топологические типы положений равновесия характерны для системы (1).

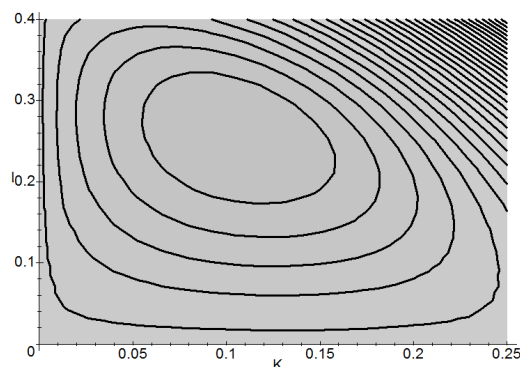


Рис. 1. Пример расположения семейства изоквант функции вида (2)

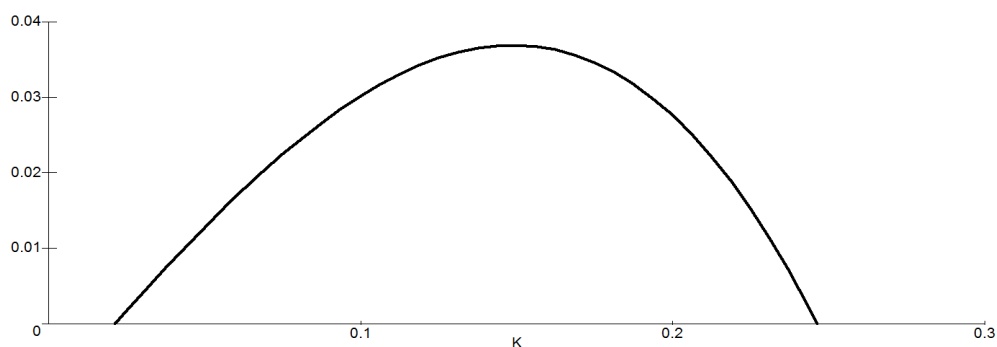


Рис. 2. Пример графика функции в левой части уравнения (5)

Область устойчивости продуктивного состояния (K_2, L_2) производственных факторов ограничена исходящими сепаратрисами седла (K_1, L_1) . Расположения траекторий изменения факторов в окрестностях точек (K_1, L_1) , (K_2, L_2) показаны на рисунке 3.

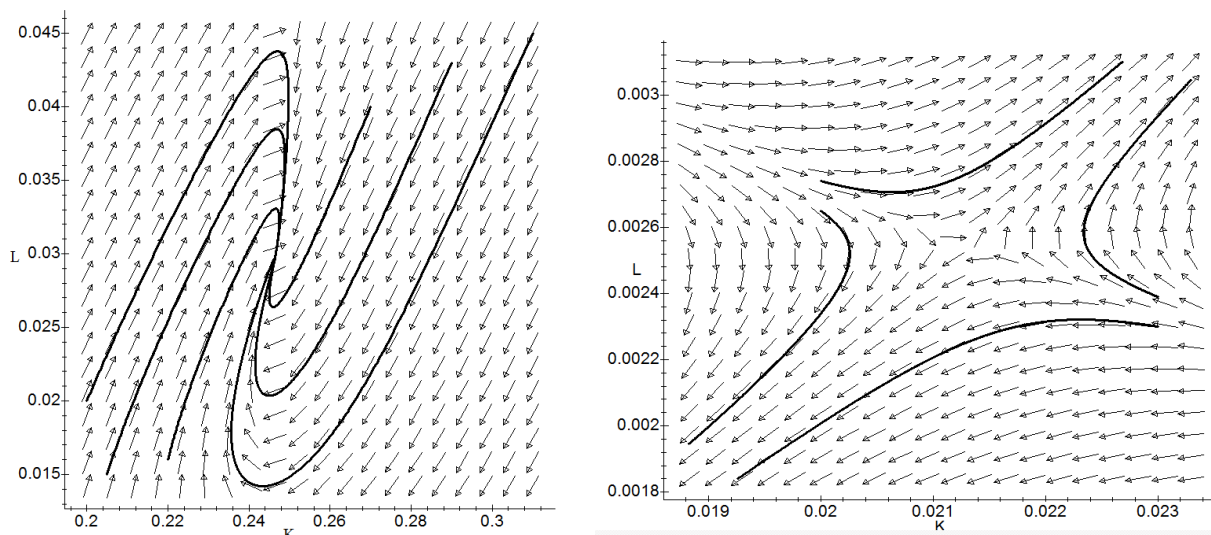


Рис. 3. Пример расположений траекторий факторов модели (1)–(2) в окрестностях продуктивного и непродуктивного положения равновесия

Библиографический список

1. Абрамов В.В. Качественное исследование модели односекторной экономики // Известия РАЕН. Дифференциальные уравнения. 2007. № 12. С. 11–15.
2. Абрамов В.В. Стационарные состояния в модели односекторной экономики // Дифференциальные уравнения и математическое моделирование. 2021. Вып. 2. С. 4–9.
3. Абрамов В.В., Юдин Д.В. Модель ограниченной односекторной экономики // Дифференциальные уравнения и математическое моделирование. 2024. Вып. 6. С. 7–15.

УДК 517.962.24, 517.962.8; ГРНТИ 27.23.19

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ НУЛЕВОГО РЕШЕНИЯ ОДНОЙ РАЗНОСТНОЙ СИСТЕМЫ

В.В. Абрамов

*Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина,
Россия, Рязань, abramov.vladimir.1971@mail.ru*

Аннотация. Исследована нормальная автономная нелинейная система уравнений в конечных разностях. Рассматривается критический случай устойчивости нулевого решения, при котором матрица коэффициентов линейного приближения равна единичной. По свойствам коэффициентов первого однородного нелинейного приближения правой части исследуемой системы установлен достаточный признак асимптотической устойчивости нулевого решения. Полученный результат применен для исследования устойчивости нулевого решения периодической по независимой переменной нормальной системы обыкновенных дифференциальных уравнений при условии, что все решения соответствующей системы линейного приближения являются периодическими.

Ключевые слова: система уравнений в конечных разностях, система обыкновенных дифференциальных уравнений, асимптотическая устойчивость нулевого решения.

ON THE STABILITY OF THE ZERO SOLUTION OF A SINGLE DIFFERENCE SYSTEM

V.V. Abramov

*Ryazan State University named after S.A. Yesenin,
Russia, Ryazan, abramov.vladimir.1971@mail.ru*

The summary. A normal autonomous nonlinear system of equations in finite differences is investigated. The critical case of stability of the null solution is considered, in which the matrix of coefficients of the linear approximation is equal to the unit one. According to the properties of the coefficients of the first homogeneous nonlinear approximation of the right-hand side of the system under study, a sufficient sign of the asymptotic stability of the null solution has been established. The obtained result is applied to study the stability of the zero solution of a periodic normal system of ordinary differential equations with respect to an independent variable, provided that all solutions of the corresponding system of linear approximation are periodic.

Keywords: system of equations in finite differences, system of ordinary differential equations, asymptotic stability of the null solution.

Устойчивость нулевого решения разностной системы

Рассмотрим систему m уравнений

$$x_{n+1} = x_n + f_k(x_n) + \tilde{f}(x_n), \quad (1)$$

в которой $n \in N \cup \{0\}$ – независимая переменная, $x \in R^m$ – фазовая переменная, решение x_n – это последовательность, $f_k(x)$ – однородная вектор-функция, то есть $f_k(\alpha x) = \alpha^k f_k(x)$ при любом $\alpha \in R$, $k > 1$, $f_k(0_m) = 0_m$, вектор-функция $\tilde{f}(x)$ удовлетворяет условиям $\tilde{f}(0_m) = 0_m$ и $\lim_{\|x\| \rightarrow 0} \|x\|^{-k} \|\tilde{f}(x)\| = 0$.

Задача 1. Установить условия для $f_k(x)$, при которых нулевое решение системы (1) асимптотически устойчиво.

Определение 1. Решение $x_n \equiv 0_m$ системы вида (1) асимптотически устойчиво, если для любого $\varepsilon > 0$ существует число $\delta > 0$, при котором из оценки $\|x_0\| < \delta$ следует, что для всех $n \in N$ имеет место оценка $\|x_n\| < \varepsilon$ и выполняется условие $\lim_{n \rightarrow +\infty} \|x_n\| = 0$.

Заметим, что в окрестности нулевого решения система (1) близка к линейной системе $x_{n+1} = x_n$, для которой все решения стационарны. То есть при решении задачи 1 имеет место критический случай по линейному приближению.

Допустим, для $f_k(x)$ можно выбрать разложение $f_k(x) = F(x)x$ и матричную норму, при которых для любого малого числа $\gamma > 0$ и любого вектора $\lambda : \|\lambda\| = 1$ имеет место оценка

$$\|E + \gamma F(\lambda)\| \leq 1 - \gamma b, \quad b > 0. \quad (2)$$

Теорема. Если выполняется оценка (1), то нулевое решение системы (1) асимптотически устойчиво.

Доказательство. В силу условий $\tilde{f}(0_m) = 0_m$, $\lim_{\|x\| \rightarrow 0} \|x\|^{-k} \|\tilde{f}(x)\| = 0$ для вектор-функции $\tilde{f}(x)$ выберем какую-либо матрицу $\tilde{F}(x)$, подходящую для разложения $\tilde{f}(x) = \tilde{F}(x)x$. Запишем систему (1) в виде

$$x_{n+1} = (E + F(x_n) + \tilde{F}(x_n))x_n. \quad (3)$$

По построению матрицы $\tilde{F}(x)$ выполняется условие $\lim_{\|x\| \rightarrow 0} \|x\|^{1-k} \|\tilde{F}(x)\| \equiv 0$. При этом для достаточно малого $\delta_0 > 0$ из неравенства $\|x\| < \delta_0$ следует соотношение $\|F(x)\| < \frac{1}{2}b\|x\|^{k-1}$. Допустим, определена величина $x_n : \|x_n\| < \delta_0$. Тогда из условий (2) и (3) следует, что имеет место оценка

$$\|x_{n+1}\| < (1 - \frac{1}{2}b\|x_n\|^{k-1})\|x_n\| < \|x_n\|. \quad (4)$$

Выберем последовательность функций Ляпунова вида $V_n(x) \equiv \|x\|$, а также вещественные непрерывные строго возрастающие функции одной вещественной переменной (функции класса Хана) вида $a(u) = u/q$, $b(u) = u \cdot q$, $c(u) = \frac{1}{2}bu^k$, где $q > 1$ – произвольно выбранное число.

Тогда для любых величин x и \tilde{x} из свойств нормы следует, что для любого члена последовательности $V_n(x)$ выполняются условия: $a(\|x\|) \leq V_n(x) \leq b(\|x\|)$, $|V_n(x) - V_n(\tilde{x})| \leq \|x - \tilde{x}\|$. Кроме того, из оценки (4) и условия $\|x_n\| < \delta_0$ следует справедливость неравенства $\|x_{n+1}\| - \|x_n\| < -\frac{1}{2}b\|x_n\|^k = -c(\|x_n\|) < -c(\|x_{n+1}\|)$. Итак, выполняются все условия предложения 2 из книги [1, с. 27]. Значит нулевое решение системы (1) асимптотически устойчиво. Теорема доказана.

Выбрав в оценке (1) конкретные матричные нормы, получим коэффициентные условия условия устойчивости, которые сводятся к условиям отрицательного диагонального доминирования однородной матрицы $F(x)$ на единичной сфере. В частности, если для $m \times m$ -матриц вида $Y = (y_{ij})$ выбрать строчную норму $\|Y\|_\infty = \max_{1 \leq i \leq m} \sum_{j=1}^m |y_{ij}|$, или столбцевую норму

$\|Y\|_1 = \max_{1 \leq j \leq m} \sum_{i=1}^m |y_{ij}|$, или евклидову норму $\|Y\|_2 = \sqrt{\rho(Y^T Y)}$, где $\rho(Y^T Y)$ – спектральный радиус матрицы $Y^T Y$, то по теореме 1 получим следующее утверждение.

Следствие. Если для некоторой $m \times m$ -матрицы $F(x) = (f_{ij}(x))$ выполняется разложение $f_k(x) = F(x)x$, при котором для любого единичного вектора λ верна одна из оценок:

- 1) $f_{ii}(\lambda) + \sum_{j=1}^m |f_{ij}(\lambda)| \leq -q_i < 0, i = \overline{1, m}$;
- 2) $f_{jj}(\lambda) + \sum_{i=1}^m |f_{ij}(\lambda)| \leq -q_j < 0, j = \overline{1, m}$;
- 3) $2f_{ii}(\lambda) + \sum_{j=1}^m |f_{ij}(\lambda) + f_{ji}(\lambda)| \leq -q_i < 0, i = \overline{1, m}$,

то нулевое решение системы (1) асимптотически устойчиво.

Связь оценки (2) с условиями 1) и 2) очевидна по определениям соответствующих норм. Связь условия 3) с оценкой (2) установлена в работе [2].

Заметим, что проверка условий следствия сводится к задачам на экстремум для однородных функций на единичной сфере. Следствие позволяет организовать компьютерную процедуру проверки устойчивости нулевого решения системы (1) или синтеза системы (1).

Устойчивость нулевого решения системы дифференциальных уравнений

Рассмотрим систему m дифференциальных уравнений

$$\dot{x} = g(t, x) = A(t)x + p(t, x), \quad (5)$$

в которой вектор-функция $g(t, x)$ непрерывно зависит от t и удовлетворяет условию $g(t + \omega, x) = g(t, x)$ для любого $t \in R$, фундаментальная матрица $X(t)$ системы линейного приближения $\dot{x} = A(t)x$ является периодической, вектор-функция $p(t, x)$ достаточно гладко зависит от x в окрестности $x = 0_m$ и удовлетворяет условиям $p(t, 0_m) \equiv 0_m$, $\lim_{\|x\| \rightarrow 0} \|x\|^{-1} \|p(t, x)\| \equiv 0$.

Задача 2. Установить признак устойчивости нулевого решения системы (5).

Обозначим $x(t, a)$ решение системы (1) с начальным значением $x(0, a) = a$. В окрестности точки $x = 0_m$ система (1) близка к линейной $\dot{x} = A(t)x$ поэтому ее решения однозначно определены своими начальными значениями, по крайней мере, при $t \in [0, \omega]$. То есть определен правый оператор монодромии $a \rightarrow x(\omega, a)$, который в силу свойств системы (1) достаточно гладко зависит от a . Согласно работе [2] свойство устойчивости ляпуновского типа для нулевого решения системы (1) формулируется с помощью оценок норм степеней оператора монодромии.

Определение 2. Решение $x = 0_m$ системы вида (5) асимптотически устойчиво, если для любого $\varepsilon > 0$ существует число $\delta > 0$, при котором из оценки $\|a\| < \delta$ следует, что для всех $n \in N$ имеет место оценка $\|x(n\omega, a)\| < \varepsilon$ и выполняется условие $\lim_{n \rightarrow +\infty} \|x(n\omega, a)\| = 0$.

По определению 2 решение задачи 2 сводится к решению задачи 1 с помощью установленной здесь теоремы для системы вида (1). При этом имеем следующее:

$x_n = x(n\omega, a)$ – степень оператора монодромии,

$x_{n+1} = x(\omega, x(n\omega, a))$ – следующая степень оператора монодромии по групповому свойству периодической динамической системы,

$X(\omega)x(n\omega, a) = x_n$ – линейное приближение для следующая степень оператора монодромии, так как в силу периодичности фундаментальной матрицы $X(\omega) = X(0) = E$,

$f_k(a)$ – первое однородное приближение вектор-функции $\int_0^{\omega} X^{-1}(t)p(t, X(t)a)dt$, кото-

рое не аннулируется при усреднении вдоль решений системы $\dot{x} = A(t)x$ на периоде,

$$\tilde{f}(a) = \int_0^{\omega} X^{-1}(t)p(t, x(t, a))dt - f_k(a).$$

Пример

В качестве примера предложенного здесь подхода решим задачу 2 для автономной системы второго порядка с нулевым линейным приближением

$$\dot{x} = p_k(x) + \tilde{p}(x), \quad (6)$$

в которой $p_k(\alpha x) = \alpha^k p_k(x)$ при любом $\alpha \in R$, $k > 1$, $(-1)^k = -1$, $p_k(0_2) = 0_2$, вектор-функция $\tilde{p}(x)$ удовлетворяет условиям $\tilde{p}(0_2) = 0_2$ и $\lim_{\|x\| \rightarrow 0} \|x\|^{-k} \|\tilde{p}(x)\| = 0$.

Рассмотрим систему (6) как систему (5) при $\omega = 1$. Так как $X(t) \equiv E$, то в соответствующей системе вида (1) получим $f_k(x) = p_k(x)$. То есть условия устойчивости нулевого решения системы (6) можно сформулировать с помощью оценки (5) в терминах свойств коэффициентов вектор-функции $p_k(x)$.

Допустим, $p_k(x) = p_3(x) = \begin{pmatrix} -3x_1^3 + 13x_1^2x_2 - 35x_1x_2^2 + 30x_2^3 \\ -15x_1^3 + 28x_1^2x_2 - 26x_1x_2^2 - 5x_2^3 \end{pmatrix}$ – первое приближение пра-

вой части системы (6), $\tilde{p}(x) = \begin{pmatrix} 2x_1^4 - 40x_2^4 \\ 4x_1^4 + 3x_2^4 \end{pmatrix}$. Тогда в соответствующей системе (3) можно вы-

брать матрицу $F(x) = \begin{pmatrix} -3x_1^2 - 2x_1x_2 - 5x_2^3 & h(x_1^2 - 2x_1x_2 + 2x_2^3) \\ -h(x_1^2 - 2x_1x_2 + 2x_2^3) & -2x_1^2 + 4x_1x_2 - 5x_2^3 \end{pmatrix}$, $h = 15$. При этом внедиаго-

нальные элементы матрицы $F(x) + F^T(x)$ равны нулю, а диагональные элементы этой матрицы – отрицательно определенные квадратичные формы. Значит, выполняется условие 3) сформулированного выше следствия. Причем величины $-q_i$ – это максимумы этих форм. Таким образом, нулевое решение системы (1) асимптотически устойчиво. Этот факт иллюстрируется рисунком 1, который построен в пакете Maple. (Заметим, что при увеличении параметра h увеличивается частота вращения траекторий вокруг начала координат.)



Рис. 1. Траектории и интегральные кривые системы вида (6)

Библиографический список

1. Халанай А. Качественная теория импульсных систем / А. Халанай, Д. Векслер // М.: Мир. – 1971.
2. Абрамов, В.В. Об одном признаке устойчивости нулевого решения периодической системы обыкновенных дифференциальных уравнений / В.В. Абрамов // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2024: сборник трудов V Международного научно-технического форума в 10-ти томах / под общ. ред. О.В. Миллоровой. – Рязань, 2024. – Т. 5. – С. 47–53.

УДК 544.354-128; ГРНТИ 47.03

ВЛИЯНИЕ АСИММЕТРИЧНОГО ПРЯМОУГОЛЬНОГО ИМПУЛЬСА НА КВАДРУПОЛЬНЫЙ ФИЛЬТР МАСС С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

А.И. Иванов^{1,2}, Н.В. Коненков²

¹Рязанский государственный медицинский университет имени академика И.П. Павлова, Российская Федерация, Рязань, sasha9182-2015@yandex.ru

²Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина, РФ, Рязань

Аннотация. В работе исследовано влияние асимметричного прямоугольного импульса со скважностью $d = 0,2$ на фильтр масс с цилиндрическими электродами. Получены и численно проинтегрированы уравнения движения ионов в полях, создаваемых круглыми электродами. Построены и изучены массовые пики для разных отношений между радиусами электродов и рабочего поля. Найдена конфигурация электродов $r/r_0 = 1,13$, позволяющая добиться максимальной разрешающей способности $R_{0,5} = 258$. Определено оптимальное время сортировки ионов $n = 150$ периодов ВЧ-поля при $r/r_0 = 1,11$, которое обеспечивает разрешение $R_{0,1} = 193$ и снижает негативное влияние низкомассового «хвоста».

Ключевые слова: квадрупольный фильтр масс, асимметричный прямоугольный импульс, цилиндрические электроды, уравнения движения ионов, комплексный потенциал, контур пропускания, разрешающая способность, коэффициент пропускания.

EFFECT OF AN ASYMMETRIC RECTANGULAR PULSE ON A QUADRUPOLE MASS FILTER WITH ROUND ELECTRODES

A.I. Ivanov^{1,2}, N.V. Konenkov²

¹Ryazan State Medical University named after academician I.P. Pavlov, Russia, Ryazan, sasha9182-2015@yandex.ru

²Ryazan State University named for S.A. Yesenin, Russia, Ryazan

The summary. The influence of an asymmetric rectangular pulse with a duty cycle of $d = 0.2$ on a mass filter with cylindrical electrodes is investigated. The equations of ion motion in the fields created by round electrodes are derived and numerically integrated. Mass peaks are constructed

and studied for different ratios between the radii of the electrodes and the working field. The electrode configuration $r/r_0 = 1.13$ was found, which allows achieving the maximum resolution $R_{0,5} = 258$. The optimal ion sorting time $n = 150$ periods of the RF field at $r/r_0 = 1.11$ is determined, which provides a resolution of $R_{0,1} = 193$ and reduces the negative effect of the low-mass "tail".

Keywords: quadrupole mass filter, asymmetric rectangular pulse, cylindrical electrodes, ion motion equations, complex potential, transmission contour, resolution, transmission.

Введение

В работах [1–4] было исследовано поведение линейной ионной ловушки и квадрупольного фильтра масс (КФМ) при управлении прямоугольным асимметричным сигналом. Такое импульсное питание дает некоторые преимущества, например, позволяет регулировать потенциал квадрупольного поля вместе с его разрешением и снижает потери ионов в линейной ионной ловушке вследствие различий в колебаниях по x и y координатам [4].

Однако в силу тематических особенностей указанных работ в них моделируются приборы только с гиперболическими электродами. При этом несмотря на генерацию идеального квадрупольного поля и другие плюсы гиперболических стержней, они трудны в изготовлении и, соответственно, приводят к большой финансовой нагрузке. Поэтому на практике обычно заменяются цилиндрическими электродами, невзирая на снижение разрешающей способности и некоторые другие недостатки [5, 6]. В связи с этим исследование квадрупольных приборов с цилиндрическими электродами по-прежнему актуально.

Целью работы является анализ влияния асимметричной формы сигнала на характеристики квадрупольного фильтра масс с круглыми электродами, поскольку это ранее не изучалось. Для достижения цели необходимо решение следующих задач: получить уравнения движения ионов в полях, создаваемых цилиндрическими электродами при управлении асимметричным прямоугольным сигналом, и численно их проинтегрировать; построить массовые пики для электродов разной конфигурации; изучить влияние времени сепарации ионов на характеристики фильтра масс. В работе применяются теоретические методы исследования, в том числе моделирование физических процессов и анализ результатов.

Форма сигнала и уравнения движения ионов

В данной работе на электроды квадрупольного поля подается асимметричный прямоугольный сигнал $f(\xi)$, форма которого подобрана с таким расчетом, чтобы среднее значение импульса за период (потенциал оси квадрупольного поля) оставалось равным нулю [3, 4]:

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

где $\xi = \frac{\Omega t}{2}$ – безразмерное время, $\Omega = \frac{2\pi}{T}$ – угловая частота, T – период, d – скважность сигнала.

Для изучения влияния асимметричного импульса на характеристики квадрупольного фильтра масс скважность d была выбрана равной 0,2 (рис. 1). Тогда амплитуда положительной части данного сигнала $A^+ = 1$, а отрицательной – $A^- = -\frac{d}{1-d} = -0,25$. Однако площади этих частей, формируемые за период π , одинаковы, что и приводит к нулевой постоянной составляющей сигнала [3, 4].

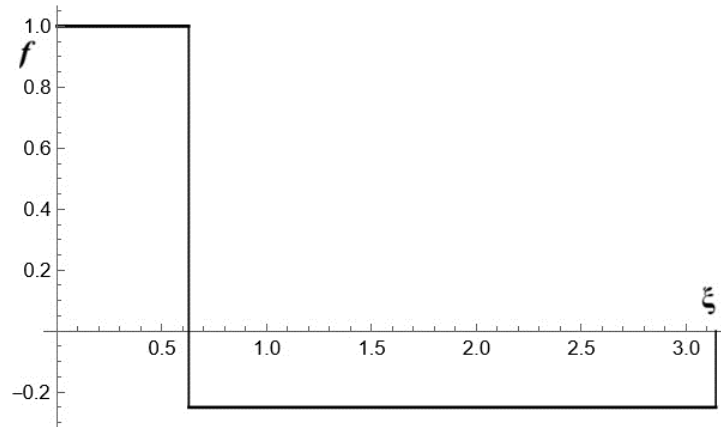


Рис. 1. Асимметричный прямоугольный сигнал со скважностью $d = 0,2$, амплитудами $A^+ = 1$, $A^- = -0,25$ и периодом π

Уравнения движения ионов в квадрупольных полях, создаваемых цилиндрическими электродами с асимметричным импульсом, принимают следующий вид [5, 7]:

$$\frac{d^2x}{d\xi^2} + \left[\frac{a}{2} + qf(\xi - \xi_0) \right] \cdot \operatorname{Re} \left[\frac{\partial}{\partial x} \sum_{k=0}^3 A_{4k+2} (x + iy)^{4k+2} \right] = 0, \quad (2)$$

$$\frac{d^2y}{d\xi^2} + \left[\frac{a}{2} + qf(\xi - \xi_0) \right] \cdot \operatorname{Re} \left[\frac{\partial}{\partial y} \sum_{k=0}^3 A_{4k+2} (x + iy)^{4k+2} \right] = 0, \quad (3)$$

где x и y – поперечные координаты, a и q – безразмерные параметры, имеющие связь с реальными характеристиками масс-анализатора:

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

где ze – заряд иона (e – заряд электрона, z – кратность ионизации);

m – его масса;

r_0 – радиус поля;

$\pm U$ – постоянное напряжение, прикладываемое к электродам;

$V = 2dV_0$ – среднее значение переменной составляющей напряжения за период (возникает в силу асимметрии сигнала);

A^+V_0 и A^-V_0 – реальные амплитуды асимметричного прямоугольного сигнала [4].

В этих уравнениях учтены первые 4 гармоники комплексного потенциала $\Phi(z)$ поля, создаваемого круглыми электродами [5]:

$$\Phi(z) = A_2 z^2 + A_6 z^6 + A_{10} z^{10} + A_{14} z^{14} + \dots, \quad (5)$$

где $z = x + iy$ – комплексное число;

A_k – амплитуды пространственных гармоник, которые зависят от отношения радиусов цилиндрических электродов r к радиусу вписанной между ними окружности r_0 .

Методы оценки влияния круглых электродов на характеристики фильтра масс

Для исследования влияния цилиндрических электродов на характеристики фильтра масс с прямоугольной асимметричной формой сигнала (1) была написана программа в системе компьютерной алгебры Wolfram Mathematica. Это позволяет численно проинтегрировать вышеописанные уравнения движения (2) – (3) методом Рунге-Кутты [8]. Начальные поперечные координаты ионов были заданы нормально распределенными случайными величинами.

нами с дисперсией $\sigma_x = 0,01$, а начальные скорости по осям X и Y – распределением Максвелла с дисперсией $\sigma_v = \frac{1}{\pi r_0 f} \sqrt{\frac{2kT}{m}}$, где $f = \frac{\Omega}{2\pi}$ – частота ВЧ-поля, k – постоянная Больцмана,

T – температура ионов [9, 10]. Начальные фазы ξ_0 влета ионов в ВЧ-поле являются значениями, случайно выбранными из равномерного распределения на интервале $(0, \pi)$. Дисперсия скоростей $\sigma_v = 0,0058$ при $T = 300$ К, $m = 609$ Th, $r_0 = 5$ мм, $f = 1$ МГц.

Численное интегрирование уравнений движения ионов (2) – (3) в квадрупольных полях, создаваемых круглыми электродами, с вышеописанными начальными условиями применяется для расчета массовых пиков (контуров пропускания), которые позволяют проанализировать характеристики КФМ. Эти контуры могут быть вычислены траекторным методом [9, 11], подразумевающим определение доли прошедших через квадрупольный масс-фильтр ионов при работе возле вершины криволинейного треугольника стабильности. Для масс-анализатора с электродами гиперболического профиля и указанными выше характеристиками, в том числе при времени сортировки ионов $n = 150$ периодов ВЧ-поля и скважности $d = 0,2$, координаты рабочей точки $q = 1,3259$, $a = 2\lambda q = 0,1851$, где параметр линии сканирования $\lambda = 0,0698$. Для круглых электродов координаты вершины зависят от соотношения между радиусом электродов r и рабочего поля r_0 .

Исследование контуров пропускания

Анализ характеристик КФМ с использованием массовых пиков проводился следующим образом. Сначала были построены и исследованы массовые пики для указанных выше параметров ионного пучка и КФМ, а также различных отношений r/r_0 (1,05-1,25) с достаточно большим шагом – 0,05. Затем было выбрано такое соотношение радиусов, при котором характеристики КФМ (коэффициент пропускания и разрешающая способность) имеют близкие к максимальным значения. Такой конфигурацией электродов, согласно предварительному анализу, является $r/r_0 = 1,10$. После этого опять строились контуры (рис. 2), но уже для узкого диапазона соотношений (1,10-1,15) и с меньшим шагом (0,01).

На рисунке 2 представлены некоторые из полученных пиков.

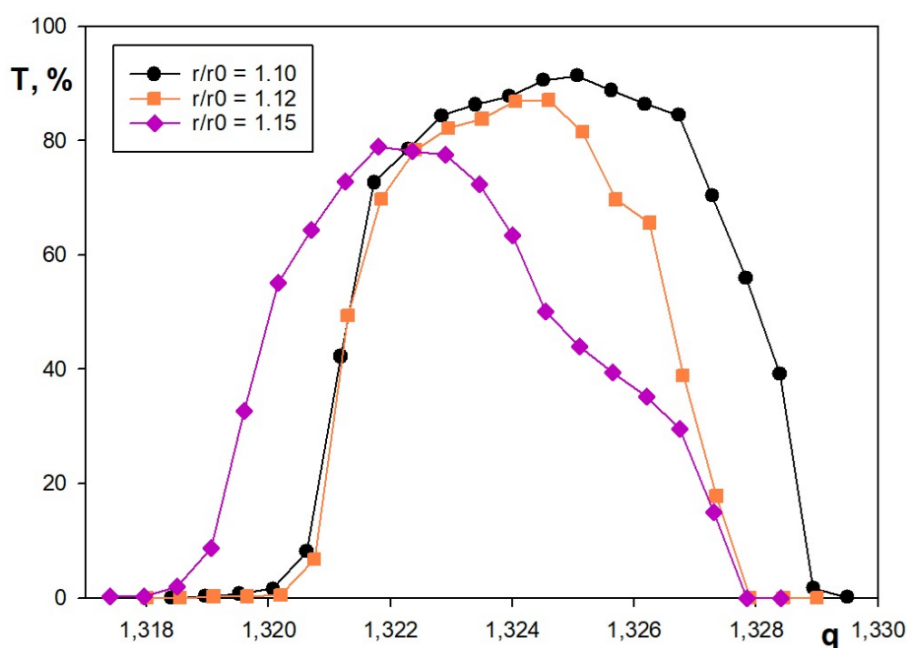


Рис. 2. Контур пропускания при $d = 0,2$; $\lambda = 0,0698$; $n = 150$ периодов

Было выяснено, что при увеличении отношения r/r_0 пики смещаются в область низких значений параметра q (область низких масс). Также видно, что увеличение отношения сначала приводит к сужению контуров пропускания, но затем после достижения определенного соотношения массовые пики начинают заметно уширяться на уровне не ниже 50 %, из-за чего наблюдается асимметрия со стороны больших масс. Это влияет на разрешающую способность. Например, контур пропускания для $r/r_0 = 1,25$ на уровне 50 % уширяется практически в 3 раза по сравнению с пиком для соотношения 1,13. Во столько же раз уменьшается разрешающая способность $R_{0,5}$. Кроме того, постепенно снижается коэффициент пропускания, что в совокупности с уширением приводит к еще большему искажению формы контура пропускания. По этим причинам необходим более глубокий анализ контуров пропускания с целью поиска наилучшего соотношения радиусов.

Для этого был построен график (рис. 3) зависимости произведения коэффициента пропускания T и разрешающей способности $R_{0,5}$ от отношения r/r_0 , а также аналогичный график, но для $R_{0,1}$. Произведения пропускания и разрешения указаны в процентах от максимального значения, рассчитанного для массового пика, формируемого идеальными электродами с гиперболическим профилем сечения. Для обеих зависимостей имеется определенное значение, соответствующее максимальным характеристикам КФМ. Однако видно, что наблюдаются некоторые различия в двух графиках. Так, максимум по разрешающей способности на уровне 50 % ($R_{0,5} = 258$) наблюдается для соотношения 1,13, тогда как по уровню 10 % ($R_{0,1} = 193$) – для 1,11. Данное различие согласуется с построенными массовыми пиками, поскольку искажение формы контуров при отношении r/r_0 в диапазоне 1,11-1,13 приводит к их сужению на уровне 50 %, но уширению на уровне 10 %. Для других конфигураций электродов наблюдается соответствие $R_{0,5}$ и $R_{0,1}$. Если учитывать сразу оба значения разрешающей способности, то оптимальным соотношением приближенно является середина интервала (1,11; 1,13) – $r/r_0 = 1,12$, когда разрешение близко к максимальному (в этом случае $R_{0,5} = 242$). Значение комплексного потенциала для данного отношения

$$\Phi(z) = 1,001081z^2 + 0,001671z^6 - 0,002424z^{10} - 0,000302z^{14} - \dots \quad (6)$$

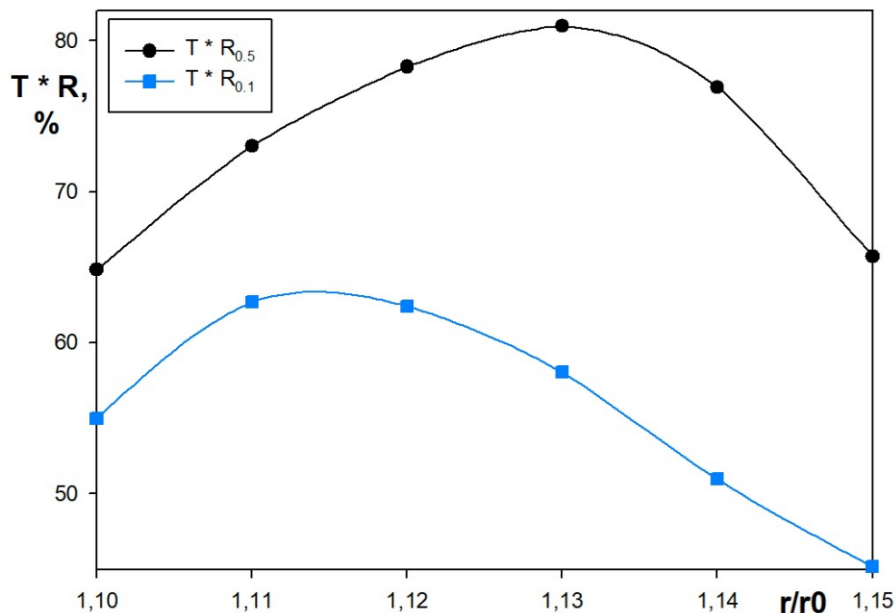


Рис. 3. Зависимость произведения пропускания и разрешения от конфигурации электродов при $d = 0,2$; $\lambda = 0,0698$; $n = 150$ периодов

Влияние времени сортировки на разрешающую способность

Для исследования влияния времени сортировки ионов, которое выражено в числе периодов ВЧ-поля n , на разрешающую способность $R_{0,1}$ при использовании круглых электро-

дов и прямоугольного асимметричного сигнала был построен график зависимости $R_{0,1}(n)$ (рис. 4). При этом отношение r/r_0 было выбрано равным 1,11, так как оно соответствует наибольшему произведению пропускания T и разрешения $R_{0,1}$.

Анализ графика позволяет заметить, что разрешающая способность $R_{0,1}$ увеличивается с ростом числа периодов времени сепарации ионов n . Причем скорость роста разрешения постепенно замедляется, что в конце концов выводит кривую на насыщение [12] (здесь не показано).

Рассмотренные в данной работе контуры пропускания были вычислены при времени разделения ионов $n = 150$ периодов ВЧ-поля. Это позволяет снизить влияние так называемого низкокассового «хвоста» [5], приводящего к негативному воздействию на чувствительность фильтра масс. Кроме того, это позволяет добиться оптимального значения разрешающей способности $R_{0,1} = 193$ при не слишком больших временных затратах.

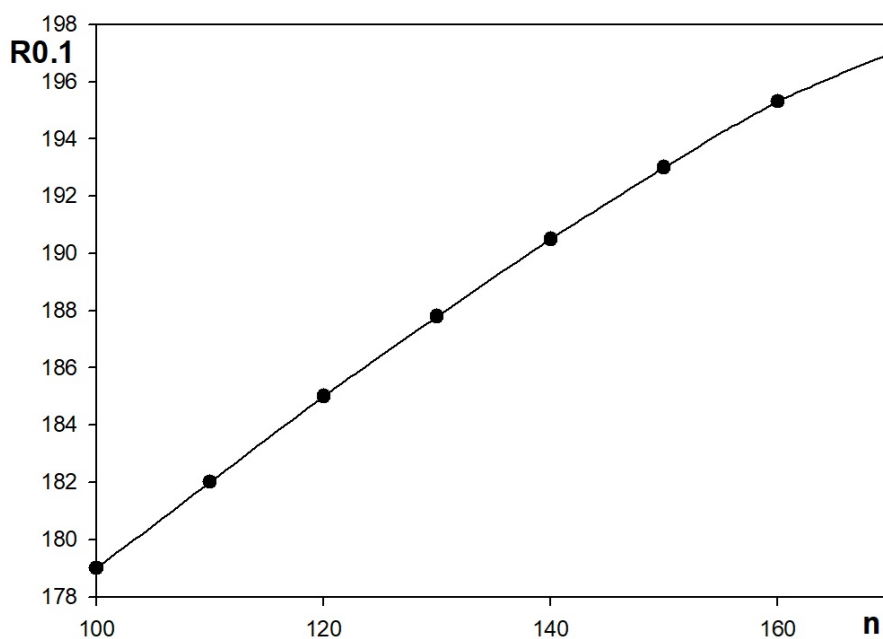


Рис. 4. Зависимость разрешающей способности $R_{0,1}$ от времени сортировки ионов n при $d = 0,2$; $\lambda = 0,0698$

Заключение

Полученные результаты позволили оценить влияние прямоугольного импульса со скважностью $d = 0,2$ на КФМ с цилиндрическими электродами. Для анализа влияния такого сигнала на параметры фильтра масс были получены численные решения уравнений движения ионов в полях, создаваемых круглыми электродами, и построены контуры пропускания для разных значений соотношений между радиусами электродов и рабочего поля. Это позволило выявить конфигурацию электродов ($r/r_0 \approx 1,11-1,13$), при которой произведение пропускания и разрешения принимает максимальное значение. Кроме того, в работе было определено оптимальное время сортировки ионов $n = 150$ периодов ВЧ-поля при соотношении 1,11, которое обеспечивает разрешающую способность $R_{0,1} = 193$ и позволяет снизить негативное влияние «хвоста» со стороны малых масс.

Библиографический список

1. Simke F., Fischer P., Marx G., et al. Simulations of a digital ion filter and a digital ion trap for heavy biomolecules. - International Journal of Mass Spectrometry, 2021, v.473 (3). - e116779.
2. 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 (1). - pp. 103–108.

3. Ivanov A.I., Sysoev A.A., Konenkov N.V. Mass-selective instability and resonance ejection modes for DIT with rectangular asymmetric wave shape. - European Journal of Mass Spectrometry, 2024, v.30 (3-4). - pp. 143–149.
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, v.59 (6). - e5030.
5. Поляков, А.С. Форма массового пика линейной ионной ловушки с цилиндрическими электродами при квадрупольном резонансном возбуждении колебаний ионов / А.С. Поляков, Н.В. Коненков, А.С. Бердников // Научное приборостроение. - 2014, Т.24, №2. - С. 49–61.
6. Sudakov M. Nonlinear equations of the ion vibration envelope in quadrupole mass filters with cylindrical rods. - International Journal of Mass Spectrometry, 2017, v.422. - pp. 62-73.
7. Дуглас, Д.Дж. Пространственные гармоники поля квадрупольного фильтра масс с круглыми электродами / Д.Дж. Дуглас, Т.А. Глебова, Н.В. Коненков, М.Ю. Судаков // Журнал технической физики. - 1999, Т.69, №10. - С. 96–101.
8. Дубков, М.В. Исследование особенностей работы квадрупольного фильтра масс в верхней и нижней вершинах четырехугольника стабильности при наличии нелинейности электрического поля / М.В. Дубков, М.А. Буробин, В.В. Иванов и т.д. // Вестник РГРТУ. - 2023, №86. - С. 162–171.
9. Серегин, К.Е. Статистический акцептанс X-острова стабильности квадрупольного фильтра масс / К.Е. Серегин, Н.В. Коненков, А.А. Дягилев // Вестник РГРТУ. - 2020, №73. - С. 154–160.
10. Konenkov N.V., Londry F., Ding C.F., Douglas D.J. Linear Quadrupoles with Added Hexapole Fields. - Journal of the American Society for Mass Spectrometry, 2006, v.17 (8). - pp. 1063-1073.
11. Konenkov N.V. Dipole and quadrupole resonance excitation in linear quadrupoles. - European Journal of Mass Spectrometry, 2023, v.30 (1). - pp. 1-35.
12. Судаков, М.Ю. Использование полос стабильности для улучшения характеристик квадрупольных фильтров масс / М.Ю. Судаков, Е.В. Мамонтов // Журнал технической физики. - 2017, Т.87, №1. - С. 97–105.

УДК 519.21; ГРНТИ 27.43.15

МЕТОД ОРТОГОНАЛЬНЫХ РАЗЛОЖЕНИЙ В ЗАДАЧЕ ОЦЕНИВАНИЯ ПРИ ПОЛИМУЛЬТИПЛИКАТИВНОЙ МОДЕЛИ ИЗМЕРЕНИЯ

К.А. Ципоркова, Г.С. Лукьянова

*Рязанский государственный радиотехнический университет,
Россия, Рязань, ktsiporkova@list.ru*

Аннотация. Рассматривается задача оценивания многомерного полезного сигнала по измерению линейной комбинации его компонент, когда ее коэффициенты представляют собой случайные функции. Найдено оптимальное решение. Получены расчетные соотношения. Рассмотрены имеющие практическую ценность примеры.

Ключевые слова: векторный полезный сигнал, косвенные измерения, математическое ожидание, ковариационная матрица, ортогональное разложение, сглаженная оценка, критерий качества.

METHOD OF ORTHOGONAL EXPANSIONS IN THE ESTIMATION PROBLEM WITH A POLYMULTIPLICATE MEASUREMENT MODEL

K.A. Tsiporkova, G.S. Lukyanova

*Ryazan State Radiotechnical University,
Russia, Ryazan, ktsiporkova@list.ru*

Abstract. Consider the problem of estimating a multidimensional useful signal by measuring a linear combination of its components, when its coefficients are random functions. The optimal solution has been found. The calculated ratios were obtained. Examples of practical value are considered.

Keywords: vector useful signal, indirect measurements, mathematical expectation, covariance matrix, orthogonal decomposition, smoothed evaluation, quality criterion.

1. Векторный (многомерный) полезный сигнал $\bar{\xi}(t)$ имеет нулевое математическое ожидание и ковариационную матрицу

$$R = [R_{ij}]_{i,j=1}^n = [cov(\xi_i(t_1); \xi_j(t_2))].$$

Измерение представляет собой линейную комбинацию компонент полезного сигнала со случайными коэффициентами $\chi_i(t)$:

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^n \chi_i(t) \xi_i(t) = \bar{\chi}^T(t) \bar{\xi}(t), \quad \bar{\chi}(t) = \text{col}(\chi_i) . \quad (1)$$

Здесь $M[\chi_i(t)] = \mu_i$, $i = \overline{1, n}$. $\bar{\chi}(t), \bar{\xi}(t)$ - независимы. Корреляционная связь между составляющими вектора $\bar{\chi}(t)$ задана матрицей

$$K = [K_{ij}]_{i,j=1}^n = [\text{cov}(\chi_i(t_1); \chi_j(t_2))] .$$

Оценка компонент полезного сигнала производится на основе ортогонального разложения измерения [1]:

$$\hat{\xi}_i(t) = \sum_m a_{im} \gamma_m \varphi_m(t), \quad \gamma_m = \int_0^T \eta(t) \varphi_m(t) dt . \quad (2)$$

$\{\varphi_m(t)\}$ – система ортонормированных на интервале наблюдения $[0; T]$ функций $(\int_0^T \varphi_m(t) \varphi_l(t) dt = \delta_{ml})$. Коэффициенты a_{im} выбираются из условия минимума квадратичного критерия качества [2]

$$J = \int_0^T M \left[\left(\bar{\xi}(t) - \bar{\xi}(t) \right)^T B \left(\bar{\xi}(t) - \bar{\xi}(t) \right) \right] dt \rightarrow \min_{a_{im}} . \quad (3)$$

2. Для дальнейших преобразований представим критерий (3) в виде:

$$J = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m b_{ij} J_{ij} ,$$

$$J_{ij} = \int_0^T M \left[\left(\hat{\xi}_i(t) - \xi_i(t) \right) \left(\hat{\xi}_j(t) - \xi_j(t) \right) \right] dt . \quad (4)$$

Выполнив действия, предписанные формулой (3'), получим

$$J_{ij} = \int_0^T R_{ij}(t, t) dt - \sum_m H_m^{ij} ,$$

$$H_m^{ij} = - \left(\sum_{p=1}^n \sum_{q=1}^n G_m(\mu_p \mu_q + k_{pq}) R_{pq} \right) a_{im} a_{jm} +$$

$$+ \left(\sum_{s=1}^n \mu_s G_m(R_{si}) \right) a_{im} + \left(\sum_{s=1}^n \mu_s G_m(R_{sj}) \right) a_{jm} ;$$

$$G_m(R) = \int_0^T \int_0^T R(t_1, t_2) \varphi_m(t_1) \varphi_m(t_2) dt_1 dt_2 .$$

Исследование на экстремум $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m b_{ij} H_m^{ij}$ приводит к системе уравнений

$$\sum_{i=1}^n b_{ir} G_m \left(\sum_{p=1}^n \sum_{q=1}^n G_m(\mu_p \mu_q + k_{pq}) R_{pq} \right) a_{im} =$$

$$= \sum_{i=1}^n \left(b_{ir} \sum_{s=1}^n \mu_s G_m(R_{sr}) \right), \quad r = \overline{1, n} . \quad (5)$$

3. Естественным усложнением задачи является включение в состав измерения аддитивной помехи $v(t)$ [3].

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^n \chi_i(t) \xi_i(t) + v(t). \quad (1')$$

Здесь $M[v(t)] = 0$;

$$\text{cov}(v(t_1), v(t_2)) = N(t_1, t_2).$$

Реализовав вычислительную схему предыдущего раздела получим систему уравнений

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n b_{ir} G_m \left(\sum_{p=1}^n \sum_{q=1}^n G_m (\mu_p \mu_q + k_{pq}) R_{pq} + N \right) a_{im} = \\ = \sum_{i=1}^n b_{ir} \sum_{s=1}^n \mu_s G_m (R_{sr}), \quad r = \overline{1, n}. \end{aligned} \quad (5')$$

Данная система получена в предположении независимости $v(t), \overline{\chi}(t), \overline{\xi}(t)$.

Рассмотрим ситуацию, представляющую практическую ценность, когда $n = 2$, а оценивается лишь одна составляющая полезного сигнала $\xi_1(t)$. В этом случае $b_{11} = 1; b_{ij} = 0$, если i или $j \geq 2$. Уравнение измерительного канала имеет вид:

$$\eta(t) = \chi_1(t) \xi_1(t) + \chi_2(t) \xi_2(t) + v(t). \quad (1'')$$

Критерий качества упрощается:

$$J = \int_0^T M \left[\left(\widehat{\xi}_1(t) - \xi_1(t) \right)^2 \right] dt \rightarrow \min_{a_m}.$$

Результаты предыдущих двух разделов трансформируются в уравнение (5') при $i = r = 1$, решение которого имеет вид:

$$a_m^* = \frac{G_m (\mu_1 R_{11} + \mu_2 R_{12})}{G_m \left((\mu_1^2 + K_{11}) R_{11} + 2(\mu_1 \mu_2 + K_{12}) R_{12} + (\mu_2^2 + K_{22}) R_{22} + N \right)}. \quad (6)$$

Максимальное же значение $H_m^* = H_m(a_m^*)$ равно

$$H_m^* = G_m (\mu_1 R_{11} + \mu_2 R_{12}) a_m^*. \quad (7)$$

4. При решении задачи оценивания производной полезного сигнала [4]

$$\xi_1(t) = \dot{\xi}(t); \quad \xi_2(t) = \xi(t).$$

Характеристики полезного двумерного сигнала связаны соотношениями:

$$\begin{aligned} R_{11}(t_1, t_2) &= \frac{\partial^2 R_{\dot{\xi}}(t_1, t_2)}{\partial t_1 \partial t_2}; \quad R_{12}(t_1, t_2) = \frac{\partial R_{\xi}(t_1, t_2)}{\partial t_2}; \\ R_{22}(t_1, t_2) &= R_{\xi}(t_1, t_2). \end{aligned}$$

Подстановка их в формулу (6) (наряду с характеристиками параметров измерительного канала) дает решение задачи оценивания.

5. Рассмотрим постановку задачи, когда полезный сигнал представляет собой квадратичную функцию $\xi(t) = \alpha t^2$ со случайным коэффициентом α

$$M[\alpha] = 0; \quad M[\alpha^2] = A$$

(квазидетерминированный случайный сигнал [5]).

Тогда $R_{22}(t_1, t_2) = A t_1^2 t_2^2; R_{12}(t_1, t_2) = 2 A t_1^2 t_2; R_{11}(t_1, t_2) = 4 A t_1 t_2$.

Удобно (в целях упрощения преобразований) считать случайные процессы $\chi_1(t)$, $\chi_2(t)$, $v(t)$ широкополосными и аппроксимировать “белым шумом” [6]. При этом примем процессы $\chi_1(t)$ и $\chi_2(t)$ некоррелированными. Тогда

$$K_{11}(t_1, t_2) = B\delta(t_2 - t_1); K_{12}(t_1, t_2) = 0;$$

$$K_{22}(t_1, t_2) = C\delta(t_2 - t_1); N(t_1, t_2) = D\delta(t_2 - t_1).$$

Линейность функционала $G_m(\cdot)$ позволяет при решении задачи ограничиться расчетом следующих величин: $G_m(R_{11})$; $G_m(R_{12})$; $G_m(R_{22})$; $G_m(K_{11}R_{11})$; $G_m(K_{22}R_{22})$; $G_m(N_{11})$.

Характер решаемой задачи (оценивание степенной функции) диктует применение в качестве базисной ортонормированной системы $\{P_0(t), P_1(t), P_2(t), \dots\}$ – системы ортонормированных на интервале наблюдения многочленов [7]:

$$P_0(t) = \frac{1}{\sqrt{T}}; P_1(t) = \frac{2\sqrt{3}}{T\sqrt{T}}\left(t - \frac{T}{2}\right); P_2(t) = \frac{2}{3\sqrt{5}T^2\sqrt{T}}\left(t^2 - Tt + \frac{t^2}{6}\right); \dots$$

В результате произведенных расчетов подстановка параметров задачи в формулу (6) дает:

$$a_0^* = \frac{\frac{AT^3}{3}(3\mu_1 + \mu_2 T)}{\frac{AT^3}{9}(3\mu_1^2 + 6\mu_1\mu_2 T + \mu_2^2 T^2) + AT^2\left(\frac{B}{3} + \frac{11CT^2}{35}\right) + N};$$

$$a_1^* = \frac{\frac{AT^3}{6}(2\mu_1 + \mu_2 T)}{\frac{AT^3}{12}(4\mu_1^2 + 4\mu_1\mu_2 T + \mu_2^2 T^2) + AT^2\left(\frac{B}{3} + \frac{11CT^2}{35}\right) + N};$$
(6')

$a_m^* = 0$ при $m \geq 2$, так как $G_{1m}(R_{11}) = G_{2m}(R_{12}) = 0$ в силу ортогональности $P_m(t)$ многочленам нулевой и первой степени.

6. Если же в отличие от задачи раздела 5 оценивается сам случайный процесс, то в рамках модели раздела 6 помимо коэффициентов a_0 и a_1 отличным от нуля оказывается и a_2 . Это объясняется квадратичным характером $\xi(t)$. При этом, разумеется, $a_k = 0$, $k \geq 3$.

Роль параметров μ_1, μ_2 которые можно интерпретировать как “средние” коэффициенты усиления измерителя по производной и сигналу, соответственно, зависит от величины T – длины интервала наблюдения. Как следует из анализа формул для коэффициентов (6') при малых значениях T основную роль играет μ_1 , а при достаточно больших – μ_2 .

Кроме того, справедливы предельные соотношения

$$\begin{aligned} & \text{- при } T \rightarrow 0 \quad a_0^*, a_1^* \rightarrow 0; \\ & \text{- при } T \rightarrow \infty \quad a_0^*, a_1^* \rightarrow 0. \end{aligned}$$

Поэтому существуют значения T , при которых величины коэффициентов достигают наибольшего значения.

Библиографический список

1. Дубовиков А.В. Модифицированный метод ортогональных разложений оценивания случайного процесса. // Математические методы в научных исследованиях. Сб. научн. трудов. - Рязань: РГРТА, 2006. – С. 4-7.
2. 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, 1983. - С. 32-36.

3. Дубовиков А.В., Ципоркова К.А. Задача сглаживания многомерного случайного сигнала методом ортогональных разложений.// Математические методы в научных исследованиях. Сб. научн. трудов. - Рязань: РГРТУ, 2012. – С. 13-21.
4. Челпанов И.Б. Оптимальная обработка сигналов в навигационных системах. М., Наука, 1967.
5. Розанов Ю.А. Теория вероятностей, случайные процессы и математическая статистика. М.: Наука, 1989
6. Брайсон А., Хо Ю-Ши. Прикладная теория оптимального управления. М., Мир, 1972.
7. Суэтин П.К. Классические ортогональные многочлены. М., Наука, 1979.

УДК 51-74; ГРНТИ 27.35.33

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА ФУНКЦИЙ МНОГИХ ПЕРЕМЕННЫХ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ

Д.О. Афонин, Г.А. Барышев, А.С. Вендин, Д.И. Малюков, И.А. Чесных, К.А. Ципоркова*

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

Аннотация. Целью работы является создание программы, предоставляющей пользователю рабочее пространство для анализа рельефа местности на основе цифровых моделей высот, а также инструмента для получения характеристик рельефа - среднего значения высоты, максимальных перепадов рельефа на выбранном участке и на всей территории.

Ключевые слова: матрица, аппроксимация, Python, базы данных, рельеф

THE USE OF MATHEMATICAL APPARATUS OF FUNCTIONS OF MANY VARIABLES FOR THE STUDY OF TERRAIN

D.O. Afonin, G.A Baryshev, A.S. Vendin, D.I. Malukov, I.A. Chesnykh, K.A. Tsiporkova*

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

Abstract. The aim of the work is to create a program that provides the user with a working space for terrain analysis based on digital elevation models, as well as a tool for obtaining terrain characteristics - the average height, maximum relief changes in a selected area and throughout the territory.

Keywords: matrix, approximation, Python, data bases, relief

В современном мире анализ рельефа местности является важным аспектом географических и экологических исследований, строительства и планирования инфраструктуры. Точное и глубокое понимание топографических особенностей местности имеет важное значение для принятия обоснованных решений в различных областях деятельности.

Однако анализ рельефа местности традиционно ассоциируется с трудоемкими и длительными процессами, требующими значительных временных ресурсов и человеческих усилий. В связи с этим возникает необходимость в разработке эффективных инструментов, способных автоматизировать и ускорить процесс анализа рельефа, а также повысить точность и достоверность получаемых результатов.

Цель настоящей работы состоит в создании программы для детальной визуализации рельефа с помощью интерактивной карты, которая представляет собой инструмент, способный обеспечить исследователей и специалистов в области географии и инженерии необходимыми средствами для проведения комплексного анализа топографических характеристик местности.

В ходе работы будет разработана программа, способная проводить анализ рельефа с высокой точностью и эффективностью, а также предоставлять пользователю детальную информацию о различных характеристиках местности.

Помимо упрощения процесса анализа, наша программа также будет способна предоставлять дополнительную информацию и аналитические возможности (оценка абсолютного значения максимальной кривизны рельефа, получение медианного значения высоты и др.),

которые помогут исследователям получать более глубокое понимание о рельефе местности и его влиянии на окружающую среду и человеческую деятельность.

Результаты данной работы могут значительно улучшить процесс анализа рельефа местности, обеспечивая более точные и надежные данные для принятия решений в различных областях науки и практики.

Предполагается, что разработанное программное обеспечение будет иметь широкий спектр применения, включая использование в геологических исследованиях, планировании территорий, а также оценке экологических рисков.

Заполнение базы данных значениями высоты

Для того, чтобы программа работала быстрее, нам пришлось ограничиться конкретным фрагментом географической карты, выбрав его так, чтобы он содержал в себе границы города Рязани. Изображение карты размером 802 на 530 пикселей представлено на Рисунке 1. На рисунке 2 представлена топографическая карта города Рязани, с которой мы работали для получения базы данных. В качестве начала координат изображения был выбран верхний левый угол, ось ОХ направлена на восток, а ОУ – на юг.



Рис. 1. Исходное изображение участка Рязани, выбранного для работы

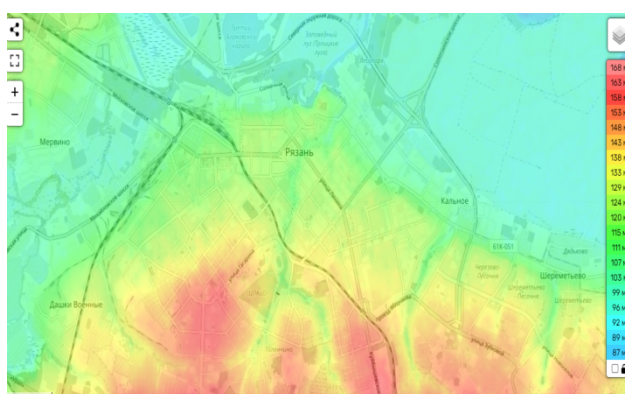


Рис. 2. Топографическая карта Рязани

Главной целью первого этапа являлось присвоение каждому пикселю изображения значения высоты рельефа. Для достижения цели, было решено каждому целому значению по оси ОХ задать соответствующую долготу, а каждому целому значению по оси ОУ- широту, и, определив широту и долготу каждого пикселя, поставить ему в соответствие высоту местности [1].

Были определены с точностью до четырёх знаков после запятой координаты верхнего левого угла карты (54.6448° с.ш, 39.6603° в.д.) и нижнего правого угла карты (54.5917° с.ш, 39.8208° в.д.). Округление было произведено именно до четырёх знаков, так как по выбранному нами масштабу карты погрешность составляла не более 10 метров.

Каждому целому значению ОУ от 0 до 529 было присвоено значение широты от 54.6448° до 54.5917° с шагом -0.0001° . Обратный порядок выбран для того, чтобы соответствовать значениям по оси ОУ на изображении. Каждому значению по ОХ от 0 до 801 было присвоено значение долготы от 39.6603° до 39.8208° с шагом 0.0002° , такой шаг используется для выполнения главного условия – каждому пикселю изображения соответствуют географические координаты на карте

Далее вычислена модуль разности широт, обозначив его буквой a , и модуль разности долгот, обозначив его буквой b , (умножение на 10000 выполнено с целью привести результат к целому числу):

$$a = |54.6448 - 54.5917| \times 10000 = 531$$

$$b = |39.6603 - 39.8208| \times 10000 = 1605 .$$

Произведение величин a и b определяет количество точек в базе данных, которым задаётся высота. Значения высот для пикселей по соответствующим им координатам получены в результате взаимодействия с сервисом `open-elevation-API`, который предоставляет сведения о высоте точек на земной поверхности. Соотнеся данные из `open-elevation-API` с координатами точек на изображении карты Рязани, удалось с высокой точностью добиться закрепления за каждым пикселем соответствующей высоты.

Аппроксимация плоскостями

С помощью информации, занесённой в базу данных, было необходимо построить рельеф местности как всей Рязани, так и отдельных частей города на выбор. Аппроксимировать поверхностями столь массивную базу данных оказалось затруднительно, поэтому было решено заменить поверхности сегментами плоскостей. Стоит отметить, что это решение привело к увеличению погрешности изображения рельефа, но позволило получить хорошие результаты, точность которых достаточна для работы с анализом рельефа. Математическая постановка решения задачи построения рельефа местности следующая. Для начала зададим матрицу размером $N \times M$, где N – высота изображения карты, M – ширина изображения карты. В a_{ij} элементе матрицы хранится значение высоты в точке на карте с координатами (i, j) .

Полученная матрица позволяет построить рельеф выбранной местности. Метод, используемый при решении задачи, работает следующим образом:

1. Отмечаем все точки на трёхмерном графике.
2. Соединяем те точки, значения абсцисс у которых одинаковы, а также отдельно те, у которых равны значения ординат. Получившиеся прямые задают сегменты плоскостей, которые отображают форму нужной нам части рельефа.
3. Вид уравнений этих плоскостей определяем на основании уравнения плоскости, проходящей через три точки. Данный метод задаёт уравнения плоскостей для того, чтобы продемонстрировать вид аппроксимированного рельефа.

В итоге получаем рельеф заданной территории по координатам точек (рис. 5). С помощью библиотеки языка программирования Python Matplotlib можно получить результаты, приведённые ниже.

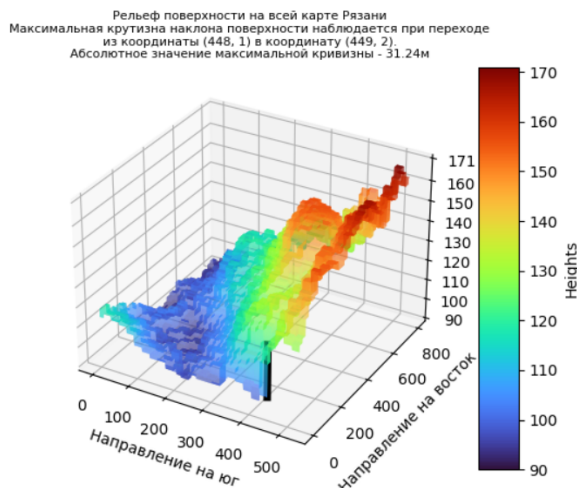


Рис. 5. Пример рельефа местности вокруг точки 100 на 100

Нахождение максимальной крутизны

Одной из важных характеристик местности является максимальная крутизна рельефа и часть пространства, в которой она наблюдается. Так как рельеф был построен путем соединения подряд всех точек (так работает Matplotlib), можем выбрать любую из них, и рассчитать векторы до восьми соседних точек. Длины заданных векторов рассчитываются по формуле

$$|\vec{v}_i| = \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2 + (z_0 - z_i)^2},$$

где $i = 1(1)8$ - индекс координат конца определённого вектора и самого вектора; (x_0, y_0) - координаты точки, выбранной пользователем. Максимальная крутизна поверхности - это вектор, имеющий наибольшую длину [2].

$$|\vec{L}| = \max(|\vec{v}_1|, |\vec{v}_2|, \dots, |\vec{v}_8|)$$

Используя эти рассуждения, в программе на языке Python нашли длины векторов и координату с самым большим перепадом, которая после завершения анализа построенного рельефа выводилась на экран.

Помимо этого, мы выделили максимальный перепад на графике, чтобы иметь лучшее представление, в какой части города он наблюдается.

Кроме того, в центре карты была добавлена точка, которая позволяет увидеть относительно чего строится фрагмент рельефа местности.

Таким образом, задача нахождения крутизны была решена.

Погрешность крутизны

Т. к. Земля является сферическим объектом, при составлении поверхности могут возникнуть небольшие отклонения от ожидаемого результата (погрешности). Оценить эти погрешности можно с помощью сравнения длины дуги, которую рассматриваем при дальнейших вычислениях, и длины хорды, которая соединяет две крайние точки.

При вычислениях погрешности обнаружено, что длина хорды практически не отличается от длины дуги (0,9999897 - отношение длины хорды к длине дуги).

$$L_{\text{дуги}} = \frac{\pi R}{180} \alpha; \quad \alpha = \frac{180 L_{\text{дуги}}}{\pi R}; \quad L_{\text{кас}} = \sqrt{2R^2 - 2R^2 \cos\left(\frac{180 L_{\text{дуги}}}{\pi R}\right)}.$$

Работа основной программы

Код представляет собой программу на Python, которая использует различные библиотеки для работы с графическим пользовательским интерфейсом (Tkinter), изображениями Python Imaging Library (PIL) и создания графиков в 3D (Matplotlib). Давайте рассмотрим более подробно, как работает этот код:

Чтение данных из базы данных:

Функция `get_database()` открывает файл "assets/db.txt" и считывает данные, храня их в переменной `database`.

Обработка нажатий мыши:

Функция `on_map_click(event)` отслеживает события нажатия мыши на холсте. Она получает информацию о точке, на которую было произведено нажатие на карте, рисует определенные линии на холсте и вычисляет подмножество данных для дальнейшего анализа.

Нахождение максимального уклона:

Функция `find_maximum_steepness(l, r, u, d)` вычисляет максимальный уклон в заданной области на основе данных о высоте из базы данных.

Построение 3D графиков:

Функция `show_all_3d_plane()` создает 3D график, отображающий всю карту с определенными аннотациями.

Функция `show_sub_3d_plane()` строит 3D график вокруг выбранной точки, выделяя максимальный уклон и предоставляя подробную информацию.

Взаимодействие с Tkinter:

Создается окно Tkinter с холстом для отображения карты и метками для вывода информации.

Добавлены кнопки для инициирования создания 3D графиков для всей карты и выбранных точек.

Главный цикл:

Программа настраивает окно GUI, связывает события мыши с холстом и инициализирует базу данных для дальнейших вычислений [3].

Пользователям предоставляются две кнопки для визуализации рельефа карты в 3D как вокруг конкретной точки, так и всей карты.

В целом, этот код обрабатывает данные о высоте из файла, позволяет пользователям взаимодействовать с картой, рассчитывает максимальные уклоны в определенных регионах и визуализирует рельеф карты в 3D с использованием Matplotlib.

Заключение

Полученная программа позволяет проводить более точный и детальный анализ рельефа местности, что может быть полезно при планировании строительства, оценке устойчивости склонов, анализе изменений в ландшафте и при решении других прикладных задач.

Библиографический список

1. Федотов С. А., Методы аппроксимации поверхностей в компьютерной графике / С.А. Федотов, В.П. Жуков // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2018. – Т. 10, №2. – С. 34-40.

2. Полин И.М., Интерполяционные и аппроксимационные методы построения поверхностей / И.М. Полин, Е.А. Антоненко // Журнал Сибирского федерального университета. Математика и физика. – 2020. – Т. 13, №3. – С. 112-118.

3. Черкасский И.М., Методы аппроксимации поверхностей в задачах обработки данных / И.М. Черкасский, Л.С. Селецкий // Математические методы и операционное исследование. – 2017. – Т. 45, №1. – С. 97-95.

УДК 004.852; ГРНТИ 28.23.15

РАДИОМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ЛОЖНОПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ НАХОДОВ ПРИ РАСПОЗНАВАНИИ ЦЕРЕБРАЛЬНЫХ АНЕВРИЗМ

А.С. Крузалов

Московский политехнический университет,
Российская Федерация, Москва, alexkruzhalov@gmail.com

Аннотация. В статье исследуется возможность использования радиомических моделей для повышения точности распознавания церебральных аневризм на основе данных КТ-ангиографии. Предлагается подход, сочетающий свёрточную нейронную сеть для сегментации и радиомическую модель для фильтрации ложноположительных прогнозов. Проведён анализ различных методов машинного обучения для построения радиомических моделей, включая логистическую регрессию и метод k ближайших соседей. Результаты показывают, что применение радиомических признаков позволяет значительно снизить количество ложноположительных прогнозов, повышая точность распознавания церебральных аневризм.

Ключевые слова: радиомика, машинное обучение, аневризмы церебральных сосудов, искусственные нейронные сети, распознавание образов.

RADIOMICS MODEL FOR DETECTION FALSE POSITIVE FINDINGS DURING RECOGNITION OF CEREBRAL ANEURYSMS

A.S. Kruzhalov

Moscow Polytechnic University,
Russia, Moscow, alexkruzhalov@gmail.com

The summary. The article explores the possibility of using radiomic models to improve the accuracy of cerebral aneurysm recognition based on CT angiography data. An approach is proposed that combines convolutional neural networks for segmentation and radiomic features for filtering false-positive predictions. Various machine learning methods, including logistic regression and the k-nearest neighbors algorithm, are analyzed. The results demonstrate that the use of radiomic features significantly reduces the number of false-positive predictions, thereby enhancing the accuracy of cerebral aneurysm recognition.

Keywords: radiomics, machine learning, cerebral aneurysms, artificial neural networks, pattern recognition.

Введение

Аневризма является аномальной выпуклостью в стенке кровеносного сосуда. Опасность аневризм заключается в возможности их разрыва, что ведёт к субарахноидальному кровоизлиянию и, зачастую, смерти или инвалидизации пациента. Поэтому в целях повышения эффективности диагностики и лечения церебральных аневризм актуальной задачей на сегодняшний день является разработка систем компьютерной автоматизированной диагностики, которые позволяют в автоматизированном режиме производить сегментацию церебральных аневризм и вычислять их морфометрические характеристики.

Основным инструментом решения задачи сегментации на сегодняшний день являются свёрточные нейронные сети. В частности, в большинстве исследований, посвящённых алгоритмам распознавания церебральных аневризм, используются нейронные сети, являющиеся развитием архитектуры UNet [1, 2, 3]. Одной из проблем таких нейросетевых моделей является наличие ложноположительных прогнозов, которые могут возникать вследствие ограниченности обучающей выборки и схожести некоторых участков сосудов головного мозга с аневризмами (например, ложные прогнозы могут возникать в местах бифуркации или изгибов сосудов).

Радиомика [4] представляет собой набор методов анализа медицинских изображений, позволяющих строить количественные описания областей интереса с учётом особенностей

их текстурных характеристик, формы и др. Извлекаемые таким образом количественные показатели могут быть использованы как биомаркеры изображений, являющиеся предикторами определённых патологических состояний. Преимуществом радиомики перед методами глубокого обучения является интерпретируемость получаемых количественных показателей и их воспроизводимость. Так как для извлечения признаков в радиомике требуется предварительное выделение области интереса, радиомические модели, как правило, не используются для решения задачи сегментации (разметка области интереса проводится либо вручную экспертом, либо с использованием нейронных сетей). В области анализа ангиограмм сосудов головного мозга методы радиомики используются в основном для оценки риска разрыва интракраниальных аневризм [5, 6, 7].

Целью данной работы является исследование возможности использования радиомических моделей для улучшения точности алгоритмов распознавания (сегментации) церебральных аневризм. Конкретно рассматривается задача построения радиомической модели для обнаружения ложноположительных находок при распознавании церебральных аневризм с использованием нейросетевой модели.

Материал и методы

В работе был использован набор данных изображений КТ-ангиографии (КТА) сосудов головного мозга, содержащий 81 КТ-серию [8]. Всего в датасете представлено 48 аневризм на 36 изображениях (присутствуют случаи множественных аневризм у одного пациента), 45 изображений – без аневризм. Толщина среза варьируется от 0,3 до 2 мм. Для каждого изображения присутствует разметка области аневризм, выполненная опытным нейрохирургом.

В качестве модели распознавания (сегментации) аневризм была использована сверточная нейронная сеть UNet-подобной архитектуры, представленная в работе [9]. Обучение длилось 100 эпох с использованием алгоритма Adam [10] (в качестве целевой функции была использована сумма бинарной перекрёстной энтропии и DiceLoss [11]), размер пакета обучающих примеров (англ. batch size) был установлен равным 6 при размере фрагмента 132. В обучающую выборку вошло 65 изображений, в тестовую – 16. В результате обучения модели оценка точности распознавания на тестовой выборке по коэффициенту Дайса-Сёренсена (DSC) составила 0,57. Оценка вычислялась как среднее значение DSC по изображениям тестовой выборки, при этом для отрицательных примеров (без аневризм) значение DSC принималось равным 1, если модель не выдала ни одного ложноположительного прогноза для данного изображения, в противном случае – равным 0. При этом модель успешно распознала 8 из 10 аневризм в тестовой выборке, но допустила 28 ложноположительных прогноза. Этим объясняется невысокое значение DSC. На рисунке 1 представлены примеры визуализаций истинно положительного и ложноположительного прогнозов.

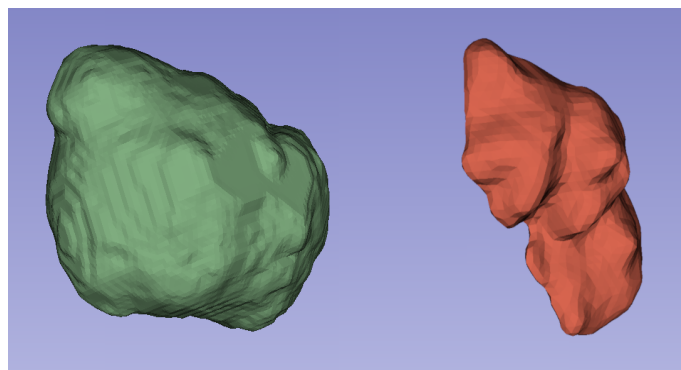


Рис. 1. Примеры 3D-моделей истинно положительно (слева) и ложноположительного (справа) прогнозов

На основе полученных прогнозов для всего набора данных был сформирован датасет радиомических признаков для построения модели обнаружения ложноположительных находок. Этапы извлечения радиомических признаков схематично представлены на рисунке 2.

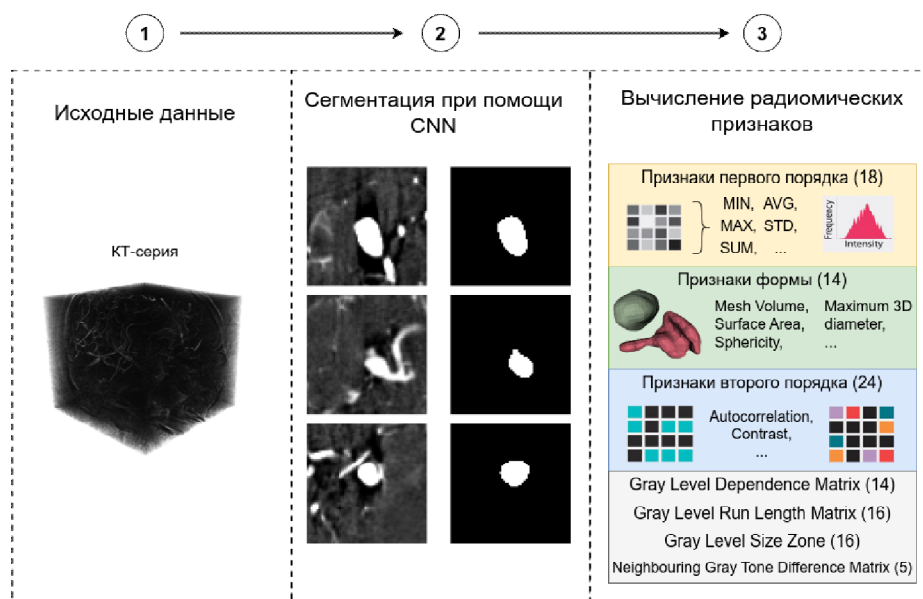


Рис. 2. Этапы извлечения радиомических признаков

Для извлечения признаков был использован программный пакет PyRadiomics [12] для языка программирования Python. Он позволяет извлекать признаки 7 категорий: признаки формы, признаки первого порядка, признаки второго порядка, Gray Level Dependence Matrix, Gray Level Run Length Matrix, Gray Level Size Zone, Neighbouring Gray Tone Difference Matrix. Всего для каждого прогноза было извлечено по 107 признаков. Всего в полученном датасете содержится 301 прогноз (39 – истинно положительные, 262 – ложноположительные).

Перед построением модели машинного обучения была произведена предобработка данных, основной целью которой является фильтрация заведомо неинформативных признаков и приведение данных к единому масштабу. Предобработка включает в себя следующие этапы:

- нормализация,
- удаление признаков с низкой дисперсией ($< 0,1$),
- удаление признаков без значимых различий между анализируемыми группами,
- сокращение размерности.

Для оценки значимости различий между рассматриваемыми группами (истинно положительные и ложноположительные прогнозы) был использован критерий Манна-Уитни с поправкой Бонферрони на множественные сравнения. Для сокращения размерности были рассмотрены два метода: кластерный анализ для выявления групп коррелированных признаков и факторный анализ (метод главных компонент [13]) для отображения данных в пространство меньшей размерности. Сокращение размерности в данном случае желательно для обеспечения возможности использовать метрические алгоритмы машинного обучения, так как в пространствах высокой размерности расстояния между объектами теряют свою «информативность» из-за так называемого «проклятья размерности» [14].

Для кластеризации был использован метод иерархической агломеративной кластеризации с применением критерия Варда [15] для вычисления расстояний между кластерами:

$$d(C_i \cup C_j, C_k) = \frac{n_i + n_k}{n_i + n_j + n_k} d(C_i, C_k) + \frac{n_j + n_k}{n_i + n_j + n_k} d(C_j, C_k) - \frac{n_k}{n_i + n_j + n_k} d(C_i, C_j), \quad (1)$$

где C_i, C_j, C_k – кластеры i, j, k ;

n_i, n_j, n_k – количество объектов в соответствующих кластерах;

d – функция расстояния между кластерами (если в кластерах по одному объекту, то используется квадрат евклидова расстояния).

В качестве метрики была использована величина, обратная коэффициенту корреляции Спирмена для рассматриваемых признаков. Определение количества кластеров было произведено на основе визуального анализа дендрограммы. Для каждого кластера был выбран один признак, показывающий наибольшую корреляцию с целевой переменной.

Было рассмотрено два метода машинного обучения для построения модели классификации ложно положительных находок: логистическая регрессия (LogReg) и метод k ближайших соседей (KNN). Логистическая регрессия была выбрана как линейная модель, обладающая высокой интерпретируемостью. Метод k ближайших соседей был выбран как метод, несмотря на свою простоту, способный строить сложные нелинейные границы решений. Для оценки качества работы построенных моделей была использована кросс-валидация по 5 фолдам. В процессе кросс-валидации были вычислены значения следующих метрик: accuracy, precision, recall, F1-score, общее количество истинно положительных (TP), ложноположительных (FP), истинно отрицательных (TN) и ложноотрицательных прогнозов (FN).

Результаты и обсуждение

Первым шагом к построению модели является подготовка данных для обучения. В результате фильтрации признаков с низкой дисперсией ($< 0,1$) было удалено 70 признаков (осталось 37). Это говорит о том, что большая часть извлечённых признаков неинформативны с точки зрения решаемой задачи. Для оставшихся признаков был проведён анализ их информативности при помощи критерия Манна-Уитни с поправкой Бонферрони на множественные сравнения. Признаки 90Percentile и Maximum были исключены из рассмотрения, так как содержат менее 3 уникальных значений в каждой из сравниваемых групп. На основании критерия Манна-Уитни при уровне значимости 0,05 значимых различий не было обнаружено для следующих признаков (в скобках указано скорректированное значение p -value): Elongation (0,45), 10Percentile (0,37), InterquartileRange (1), MeanAbsoluteDeviation (1), Mean (0,12), Minimum (0,14), RobustMeanAbsoluteDeviation (1), RootMeanSquared (0,08). Указанные признаки были исключены из дальнейшего рассмотрения (осталось 27).

Далее была произведена иерархическая кластеризация оставшихся признаков с использованием критерия Варда. Дендрограмма полученного разбиения представлена на рисунке 3.

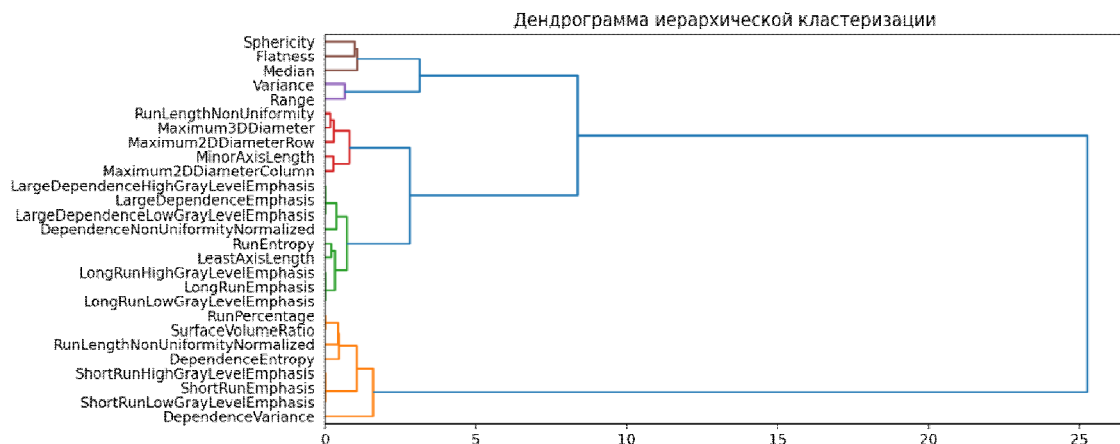


Рис. 3. Дендрограмма агломеративной иерархической кластеризации

На основе анализа дендрограммы порог для определения разбиения признаков на группы был установлен равным 2,5. Это даёт разбиение признаков на 5 групп (кластеров). Для каждого кластера был выбран один признак, наиболее коррелированный с целевой переменной (в скобках указано значение коэффициента корреляции Спирмена): Median (0,34), Range (0,29), MinorAxisLength (0,39), LargeDependenceEmphasis (0,43), ShortRunEmphasis (-0,46).

Для построения модели классификации ложноположительных находок было произведено 5 экспериментов (табл. 1). В первом эксперименте в качестве базовой модели (Baseline) была использована модель на основе «степени уверенности» (англ. confidence) нейронной сети в данном прогнозе. Этот показатель был вычислен как среднее значение оценки принадлежности вокселя области интереса (аневризме) для всех вокселей прогноза. В 4 оставшихся экспериментах были использованы модели логистической регрессии и метода k ближайших соседей, обученные на датасете радиомических признаков с использованием кластерного анализа для отбора признаков (Cluster) и метода главных компонент (PCA).

Главные компоненты были вычислены на основе матрицы ковариации, полученной для 27 признаков, оставшихся после предварительной фильтрации. При использовании метода главных компонент, согласно критерию Кайзера, для обучения модели были отобраны первые 10 главных компонент.

Таблица 1. Результаты вычислительных экспериментов

№	Модель	accuracy	precision	recall	F1-score	TP	FP	TN	FN
1	Baseline (confidence > 0,9)	0,67	0,26	0,87	0,40	34	95	167	5
2	LogReg (Cluster)	0,89	0,90	0,16	0,26	6	1	261	33
3	LogReg (PCA)	0,93	0,93	0,51	0,66	20	2	260	19
4	KNN (Cluster)	0,94	0,78	0,76	0,76	30	9	253	9
5	KNN (PCA)	0,95	0,85	0,73	0,79	29	5	257	10

Как показывают результаты экспериментов, метод главных компонент позволяет построить более информативное признаковое описание по сравнению с применением кластерного анализа, как с точки зрения логистической регрессии, так и с точки зрения метода KNN. Однако, все построенные модели показали значительно более высокую точность распознавания по сравнению с базовой моделью. Это говорит о том, что радиомические признаки содержат в себе значимую информацию, позволяющую различить истинно положительные и ложноположительные прогнозы. Наивысшей точности распознавания удалось достичь в эксперименте № 5 при использовании методов KNN и PCA.

Точность распознавания нейросетевой модели без использования дополнительной фильтрации ложноположительных находок составила $DSC = 0,57$, с использованием фильтрации на основе модели из эксперимента № 5 – $DSC = 0,71$ (медианное значение – 0,93). При этом количество ложноположительных прогнозов в тестовой выборке сократилось с 28 до 1. Количество ложноположительных прогнозов в расчёте на одно изображение тестовой выборки составило 0,0625 (FPs/scans). Полученный результат сопоставим с исследованиями последних лет других авторов. Например, в работе Shahzad R. et al.[2] была получена точность распознавания $DSC = 0,75$ (медианное значение), а количество ложноположительных прогнозов на одно изображение $FPs/cases = 0,81$. В работе Shi Z. et al. [3] – $DSC = 0,75$; $FPs/scans = 0,29$.

Заключение

В работе был проведён анализ эффективности применения различных моделей машинного обучения и методов отбора признаков и понижения размерности для решения задачи построения радиомической модели обнаружения ложноположительных находок при распознавании церебральных аневризм. В ходе исследования было показано, что на основе радиомических признаков можно построить модель, позволяющую существенно снизить коли-

чество ложноположительных прогнозов. В работе были рассмотрены всего два метода машинного обучения (логистическая регрессия и метод k ближайших соседей), поэтому в качестве основного направления работы для дальнейших исследований можно отметить расширение набора данных и анализ других более сложных нелинейных моделей.

Библиографический список

1. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation // Medical image computing and computer-assisted intervention–MICCAI 2015: 18th international conference, Munich, Germany, October 5-9, 2015, proceedings, part III 18. – Springer international publishing, 2015. – С. 234-241.
2. Shahzad R. et al. Fully automated detection and segmentation of intracranial aneurysms in subarachnoid hemorrhage on CTA using deep learning // Scientific Reports. – 2020. – Т. 10. – №. 1. – С. 21799.
3. Shi Z. et al. A clinically applicable deep-learning model for detecting intracranial aneurysm in computed tomography angiography images // Nature communications. – 2020. – Т. 11. – №. 1. – С. 6090.
4. Lambin P. et al. Radiomics: extracting more information from medical images using advanced feature analysis // European journal of cancer. – 2012. – Т. 48. – №. 4. – С. 441-446.
5. Wang H. et al. Predictive value of radiomics for intracranial aneurysm rupture: a systematic review and meta-analysis // Frontiers in Neuroscience. – 2024. – Т. 18. – С. 1474780.
6. Veeturi S. S. et al. Radiomics-Based Predictive Nomogram for Assessing the Risk of Intracranial Aneurysms // Translational stroke research. – 2024. – С. 1-9.
7. Zhong J. et al. Diagnostic and predictive value of radiomics-based machine learning for intracranial aneurysm rupture status: a systematic review and meta-analysis // Neurosurgical review. – 2024. – Т. 47. – №. 1. – С. 1-14.
8. Гаврилов А. В., Благодскова Е. Р., и др. База данных DICOM-изображений компьютерно-томографической ангиографии церебральных сосудов и сегментаций выявленных на них интракраниальных аневризм : база данных / ФГБОУ ВО Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, 2024.
9. Kruzhalov A., Philippovich A. Patch-Based Convolutional Neural Network for Cerebral Aneurysm Recognition // 2024 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon). – IEEE, 2024. – С. 855-859.
10. Kingma D. P. Adam: A method for stochastic optimization // arXiv preprint arXiv:1412.6980. – 2014.
11. Sudre C. H. et al. Generalised dice overlap as a deep learning loss function for highly unbalanced segmentations // Deep Learning in Medical Image Analysis and Multimodal Learning for Clinical Decision Support: Third International Workshop, DLMIA 2017, and 7th International Workshop, ML-CDS 2017, Held in Conjunction with MICCAI 2017, Québec City, QC, Canada, September 14, Proceedings 3. – Springer International Publishing, 2017. – С. 240-248.
12. Van Griethuysen J. J. M. et al. Computational radiomics system to decode the radiographic phenotype // Cancer research. – 2017. – Т. 77. – №. 21. – С. e104-e107.
13. Pearson K. LIII. On lines and planes of closest fit to systems of points in space // The London, Edinburgh, and Dublin philosophical magazine and journal of science. – 1901. – Т. 2. – №. 11. – С. 559-572.
14. Indyk P., Motwani R. Approximate nearest neighbors: towards removing the curse of dimensionality // Proceedings of the thirtieth annual ACM symposium on Theory of computing. – 1998. – С. 604-613.
15. Ward Jr J. H. Hierarchical grouping to optimize an objective function // Journal of the American statistical association. – 1963. – Т. 58. – №. 301. – С. 236-244.

УДК 519.688; ГРНТИ 50.41

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ВНЕДРЕНИИ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ РАСЧЕТА СТОИМОСТИ КОММУНАЛЬНЫХ УСЛУГ

М.Г. Костиков

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, m.kostikov@abonentplus.ru

Аннотация. В работе рассматривается техническая сторона процесса внедрения информационной системы расчета стоимости коммунальных услуг. Рассмотрен процесс конвертации данных из исходной в целевую БД. Приведены преимущества автоматизированного анализа содержимого БД. Рассмотрена процедура сверки, позволяющая с заданной точностью гарантировать соответствие начислений при смене программного обеспечения. Приведена математическая модель, выполнена ее параметрическая идентификация. Сделаны выводы о практическом использовании представленного подхода в организациях Рязанской области и других регионов РФ.

Ключевые слова: внедрение информационной системы, конвертация данных, математическое моделирование, параметрическая идентификация модели.

APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELING METHODS IN THE IMPLEMENTATION OF AN INFORMATION SYSTEM FOR CALCULATING THE COST OF PUBLIC SERVICES

M.G. Kostikov

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, m.kostikov@abonentplus.ru

The summary. The paper considers the technical side of the process of introducing a foreign utility cost calculation system. The process of converting data from the source database to the target database is considered. The advantages of automated database content analysis are given. The reconciliation procedure is considered, which makes it possible to guarantee compliance with accruals with a given accuracy when changing software. A mathematical model is presented and its parametric identification is performed. Conclusions are drawn about the practical use of the presented approach in the organization of the Ryazan region and other regions of the Russian Federation.

Keywords: implementation of information systems, data conversion, mathematical modeling, parametric identification of models.

Современные требования к цифровизации экономики стимулируют развитие информационных систем в различных отраслях народного хозяйства. Не является исключением и жилищно-коммунальная сфера. Основной задачей в контексте информационной системы в этой сфере является расчет начисления и прием оплаты за жилищно-коммунальные услуги (ЖКУ) от населения [1]. На данный момент подавляющее число даже относительно небольших организаций, работающих в данной сфере, используют в своей деятельности специализированные расчетные системы. Однако требования Правительства РФ, связанные с обязательной интеграцией подобных систем с системой ГИС ЖКХ [2, 3], а также постоянно усложняющийся регламент расчета [4] накладывают все более высокие требования к информационным системам, реализующим данные функции. На практике это часто приводит к смене устаревшего программного обеспечения на более современное и функциональное. При этом перед разработчиками стоит задача не только разработать систему, но и наполнить ее данными из предыдущей системы и обеспечить преемственность расчетных операций. В статье рассмотрено применение методов математического моделирования и параметрическая идентификация, для выполнения процедуры сверки расчетов – обязательного этапа при внедрении нового программного обеспечения.

Конвертация данных – это процесс преобразования исходных данных из одного способа хранения (исходного) в другой (целевой) с сохранением основного логического-структурного содержания информации. В зависимости от задачи при конвертации необходимо сохранить данные, связи в данных, структуру таблиц, ключи, ограничения, триггеры и т.д. Конечному пользователю важно, чтобы необходимые для него данные перенеслись в требуемом объеме, не потеряли свою актуальность и достоверность. Способ организации базы данных в этом случае конечному пользователю не важен. А перед поставщиками нового программного обеспечения ставится задача по переносу и адаптации данных под внедряемую систему.

Сложность конвертации баз данных заключается не только в том, что базы могут находиться под управлением разных СУБД (или вообще без СУБД) и в целом иметь различную организацию доступа к данным, но также в том, что каждая система имеет свою уникальную структуру базы данных.

Автоматизированный анализ может исследовать большие объемы данных на предмет зависимостей и закономерностей, подсчет статистических характеристик и различных других показателей, на основе которых становится возможным выдвигать предположения о структуре базы данных. Важно понимать, что такой анализ носит вероятностный характер и не может гарантировать полной достоверности результатов. Результаты, полученные в ходе анализа, являются подсказкой разработчику программы-конвертера, а не техническим заданием. Автоматизированный анализ базы данных позволит повысить скорость и эффектив-

ность конвертации. А его сопровождение после очередной конвертации позволит получать все более и более достоверные результаты.

Для того, чтобы оценить назначение исследуемого столбца, необходимо проверить его на соответствие определенным критериям. У выделенных категорий эти критерии идеологически отличаются. Критерии для физических объектов берут свое начало из фундаментальных основ реляционных баз данных. Так, например, для оценки столбца на признак первичного ключа необходимо проверить, что в нем не содержится пустых значений и все значения уникальны. Критерии для логических объектов базируются на исследуемой предметной области и формируют систему правил для каждого логического типа искомым объектов.

Следующим этапом, после конвертации данных является определение алгоритмов и методов расчета. Расчет размера платы за ЖКУ регламентируется федеральными и региональными постановлениями. При этом определенные параметры расчета могут задаваться непосредственно организацией поставщиком услуг [5]. Учитывая социальную значимость предметной области, необходимо обеспечить бесшовную смену программного обеспечения таким образом, чтобы абонент – потребитель КУ, не столкнулся с какими-либо ошибками в расчете и мог сопоставить платежную квитанцию, полученную в новом и старом программном обеспечении.

Рассмотрим процесс расчета размера платы за коммунальные услуги как объект математического моделирования. При этом имеет смысл рассматривать именно вычислительно емкие, массовые операции, такие как начисление на новый месяц или перерасчет за период. Такие операции имеют групповой характер, выполняются для множества абонентов и коммунальных услуг за заданный временной интервал [6].

В качестве вектора входных независимых переменных $x \in X$ модели рассмотрим множество абонентов, для которых выполняется расчет. Под абонентом в этом случае понимается совокупность количественных и качественных характеристик, показаний приборов учета и т.д., являющихся исходными данными для расчета абонентской платы за ЖКУ. Вектор $a \in A$ включает настраиваемые параметры модели (нормативы потребления, тарифы и цены коммунального ресурса, корректировочные и повышающие коэффициенты и т.д.). Вектор выходных переменных $y \in Y$, включает расчетные значения начислений по множеству КУ для группы абонентов.

Таким образом, математической моделью исследуемого объекта назовем функциональную (операторную) зависимость векторов (x, y, a) , описывающую с определенной точностью выполнение расчетов начислений по множеству КУ (1):

$$F(x, y, a) = 0 \quad (1)$$

В модели (1) не определен вектор $a = \{a_1, a_2, \dots, a_k\}$, будем называть его вектором параметров. Он принципиально отличается от координат x, y тем, что он неизмерим, но его можно вычислить по известным экспериментальным данным x^s, y^s , т.е. в векторной форме имеем соотношение: $a = a(x^s, y^s)$.

Особенностью предметной области является тот факт, что результат выполнения расчета подчиняется требованиям регламентирующих правительственных актов. Таким образом, модель можно считать адекватной только в том случае, если Y , полученный в результате моделирования, и Y^s , полученный по экспериментальным данным, совпадут с заданной точностью. Так как расчет выполняется одновременно и в натуральном и в денежном выражении, то для подтверждения адекватности модели должны выполняться следующие выражения (2):

$$\begin{aligned} \|y_s^{\exists} - y_s(x^{\exists}, a^*)\| &< \delta_s; \\ \|y_v^{\exists} - y_v(x^{\exists}, a^*)\| &< \delta_v, \end{aligned} \quad (2)$$

где y_s^{\exists} – вектор выходных параметров, полученный экспериментально и связанный с начислением в денежном выражении;

y_v^{\exists} – вектор выходных параметров, полученный экспериментально связанный и с начислением в натуральном выражении;

δ_s, δ_v – допустимая погрешность в натуральном и денежном выражении соответственно.

Значения допустимой погрешности можно определить. Так, суммы начисления предъявляются к оплате абонентам с точностью до копеек. Таким образом, минимальная допустимая погрешность составляет 0,005 рубля. Однако, учитывая необходимость расчета пени, которые начисляются ежедневно, и суммируются при выставлении счета за месяц, во избежание ситуации с накоплением погрешности примем $\delta_s = 5 \cdot 10^{-5}$ руб. Учитывая тот факт, что тариф устанавливается нормативными актами с точностью до 2-х знаков после запятой, для расчета без потери точности будет достаточно значения $\delta_v = 5 \cdot 10^{-7}$ единиц коммунального ресурса.

Адекватность предложенной модели можно подтвердить. Организация, в которой выполняется внедрение программного обеспечения, как правило, имеет некоторую информационную систему, выполняющую расчетные операции, но требующую замены. При смене программного обеспечения актуальной является задача сохранения преемственности расчета в старой и новой системах. С этой целью расчет начислений выполняют в двух системах (новой, рассматриваемой в работе, и старой, имеющейся у организации). Далее запускается процедура сверки, цель которой – получение списка расхождений. Если расхождения найдены, выполняется анализ, по результатам которого либо признается ошибка в старой системе, либо новая система конфигурируется таким образом, чтобы данный класс расхождений не повторялся. Затем выполняется следующая итерация сверки (выполнение расчета с учетом новых значений конфигурационных параметров и сравнение результатов), до тех пор, пока расхождений не останется.

Стоит отметить, что порядок расчета для различных коммунальных ресурсов может отличаться. Кроме того, расчет за один и тот же коммунальный ресурс может отличаться в различных организациях (могут применяться различные пункты федеральных постановлений или различаться региональные постановления и требования собственно организации-поставщика.) Так организация может принять решение о не начислении пени за просроченную задолженность, не применении повышающих коэффициентов, для помещений, не оборудованных приборами учета и т.д. [5]. Рассмотрим в общем виде итерационный алгоритм проверки адекватности модели (параметрической идентификации) на примере расчета размера платы за коммунальную услугу отопление:

1. Возьмем самую простую (минимально сложную) структуру $F_1(x, y, a)$ математической модели. В соответствии с Постановлением Правительства в простейшем случае расчет размера ежемесячного начисления услуги отопление для абонента выполняется как:

$$S = C \cdot N \cdot T, \quad (3)$$

где C – количественная характеристика абонента, используемая для расчета начисления; N – норматив потребления коммунальной услуги;

T – стоимость единицы коммунального ресурса, установленная в соответствии с законодательством Российской Федерации;

S – размер платы за коммунальную услугу для заданного абонента.

На практике, при внедрении системы, могут возникать ситуации, когда не все исходные данные для расчета известны. Так, данные касающиеся тарифов и цен, как правило, утверждаются региональной энергетической комиссией, и известны изначально. Правильность значений будет проверена в любом случае, однако, в расчете они обычно не нужны. Другая часть параметров, такие как: нормативы потребления, различные коэффициенты, применяющиеся при выполнении расчета – могут потребовать вычислений.

2. Так как имеются экспериментальные данные x^3, y^3 полученные из предыдущей системы, то выполнив решение уравнения $y_1 = y_1(x, a)$, найдем параметр конфигурации $a_1 = a(x^3, y^3, F_1)$ (в данном случае, норматив потребления).

$$N = S / (C \cdot T) \quad (4)$$

3. Используя полученный параметр a_1 , найдем решение $y_1 = y_1(x^3, a_1)$, где x^3 – не использованные в п.2 данные.

4. Вычислим (погрешность) между экспериментальными данными y^3 (не использованными в п.2) и расчетными $y_1(x^3, a_1)$:

$$\|y^3 - y_1(x^3, a_1)\| = \rho_1. \quad (5)$$

5. Сравним ρ_1 с δ_s : если $|\rho_1| < 5 \cdot 10^{-5}$ руб., то задачи структурной и попутно параметрической идентификации решены, т.е. построена подходящая математическая модель, удовлетворяющая требованиям пользователя. В противном случае следует возврат к п.1 и производится выбор более сложной структуры $F_2(x, y, a)$ математической модели. В частности, для ресурса отопление, в качестве следующей итерации может использоваться структура (6), предполагающая наличие абонентов в многоквартирном доме с индивидуальным отоплением:

$$S = \left(C \cdot \frac{N \cdot (C^{об} - C^{инд})}{C^{об} - C^{инд} + C^{ои}} + \frac{C \cdot C^{ои} \cdot N \cdot (C^{об} - C^{инд})}{C^{об} \cdot (C^{об} - C^{инд} + C^{ои})} \right) \cdot T, \quad (6)$$

где $C^{ои}$ - общая площадь помещений, входящих в состав общего имущества в многоквартирном доме;

$C^{об}$ - общая площадь всех жилых и нежилых помещений в многоквартирном доме;

$C^{инд}$ - общая площадь жилых и нежилых помещений, в которых технической документацией на многоквартирный дом не предусмотрено наличие приборов отопления или в которых в соответствии со схемой теплоснабжения, утвержденной в соответствии с Федеральным законом "О теплоснабжении", осуществляется использование индивидуальных квартирных источников тепловой энергии.

В следующих итерациях, структура может усложняться: особый порядок расчета общедомовых площадей, поставка ресурса ненадлежащего качества или с перерывами, превышающими допустимое значение, наличие индивидуальных и групповых приборов учета и т.д.

Результатом выполнения сверки является полная параметрическая идентификация модели, т.е. нахождение таких параметров вектора a , при которых расчет, выполненный на основе модели, совпадает с экспериментальными данными.

Данный метод на постоянной основе применяется на практике при внедрении автоматизированной расчетной системы «Абонент+». Использование параметрической идентификации и выполнение сверки на ее основе, позволяют осуществить смену программного обеспечения, сохранив правила по которым выполняется расчет, в том числе в случаях, когда определенные параметры не известны сотрудникам организации, но используются в старом

ПО. Метод позволяет с заданной точностью сверить нормативное начисление абонентов, убедиться в том что данные для расчета переписаны верно и методы их обработки соответствуют регламенту расчета. С использованием предложенного метода осуществлено внедрение системы у крупнейших ресурсоснабжающих организаций Рязанской области.

Библиографический список

1. Аникеев Д.В., Аникеев С.В., Костиков М.Г., Маркин А.В., Пудова А.В. "Концептуальная модель биллинга коммунальных ресурсов и жилищных услуг." Наука в современном мире: приоритеты развития. Материалы V международной научно-практической конференции — НИЦ «Ника», г.Уфа, 2019. С.64-73
2. Государственная информационная система жилищно-коммунального хозяйства (ГИС ЖКХ) / Оснащенность многоквартирных домов общедомовыми приборами учета. [Электронный ресурс] <https://dom.gosuslugi.ru/#!/common-meters>, (дата обращения 28.09.2024).
3. Распоряжение Правительства России от 10 июня 2011 г. N 1011-р Российская газета.
4. Костиков М.Г., Миронов В.В. Принципы конфигурирования информационной системы расчета за жилищно-коммунальные услуги. Труды международного симпозиума Надежность и качество. Том 1. – Пенза, 2024. С. 100-104.
5. Аникеев С.В., Костиков М.Г., Маркин А.В. Математическая модель расчет платы за жилищно-коммунальные услуги на основе матричной алгебры. / Научно технический журнал «Вестник РГРТУ» № 54 – РГРТУ, 2015. С. 54-61
6. Аникеев, М.Г. Костиков, В.В. Миронов. Информационная система «Абонент +» и опыт ее внедрения на предприятиях ЦФО. / Научно-методический журнал «Информатизация образования и науки» № 4(48) –Москва, 2020 С. 156-172 С.В.

УДК 517.926

ПРОГРАММА РАБОТ ПО АНАЛИЗУ УСТОЙЧИВОСТИ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ С КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИМИ И МУЛЬТИПЕРИОДИЧЕСКИМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ПОНТРЯГИНА

Т.Л. Львова, В.В. Миронов

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, lvovatl@yandex.ru, mironov1vv@mail.ru*

Аннотация. В работе вводятся понятия квазипериодических и мультипериодических функций. Для системы линейных дифференциальных уравнений с периодическими коэффициентами сформулирована теорема Флоке. Описана проблема поиска достаточных условий устойчивости и неустойчивости системы линейных дифференциальных уравнений. Приведены пункты программы работ по анализу устойчивости линейных систем дифференциальных уравнений с квазипериодическими и мультипериодическими коэффициентами.

Ключевые слова: устойчивость линейных систем дифференциальных уравнений, матрица монодромии, мультипликаторы, квазипериодические функции, мультипериодические функции.

THE PROGRAM OF WORK ON THE STABILITY ANALYSIS OF LINEAR SYSTEMS OF DIFFERENTIAL EQUATIONS WITH QUASIPERIODIC AND MULTIPERIODIC COEFFICIENTS BASED ON THE PONTRYAGIN METHOD

T.L. Lvova, V.V. Mironov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, lvovatl@yandex.ru, mironov1vv@mail.ru*

The summary. The paper introduces the concepts of quasi-periodic and multiperiodic functions. Floquet's theorem is formulated for a system of linear differential equations with periodic coefficients. The problem of finding sufficient conditions for stability and instability of a system of linear differential equations is described. The points of the program of work on the stability analysis of linear systems of differential equations with quasiperiodic and multiperiodic coefficients are given.

Keywords: stability of linear systems of differential equations, monodromy matrix, multipliers, quasi-periodic functions, multiperiodic functions.

Одним из главных требований, предъявляемых к процессам, описываемым дифференциальными уравнениями, является требование устойчивости. Хотя вопросы исследования устойчивости зародились под влиянием конкретных задач механики, в настоящее время они проникли всюду, где используются дифференциальные уравнения. Наиболее общее определение устойчивости было сформулировано А.М. Ляпуновым [1]. Им же были установлены достаточные условия устойчивости и неустойчивости невозмущенного движения, описываемого системой обыкновенных дифференциальных уравнений. Вопрос об устойчивости или неустойчивости связывался с наличием функции, производная которой по времени, взятая в силу системы дифференциальных уравнений, обладает определенными свойствами.

Расчет динамической устойчивости упругих систем, периодических режимов систем автоматического регулирования, ускорителей элементарных частиц, линий высоковольтных передач, теория электрических машин с параметрическим возбуждением, ряд задач небесной механики, нейронные сети, теория связи, теории управления, динамики машин и другие вопросы приводят к системам линейных дифференциальных уравнений с периодическими и почти периодическими коэффициентами [2]. Эти уравнения появляются также как уравнения в вариациях. Несмотря на то, что многие задачи практики описываются нелинейными дифференциальными уравнениями, часто линейные приближения являются удобным средством изучения проблемы. В связи с этим возникает интерес к асимптотике решений и, в частности, к устойчивости.

В данной статье введем понятие квазипериодических и мультипериодических функций, составим программу работ по анализу устойчивости линейных систем дифференциальных уравнений с квазипериодическими и мультипериодическими коэффициентами на основе метода Понтрягина.

Квазипериодические функции

Назовем вектор-функцию $f(t)$ квазипериодической со спектром W , если

$$f(t) = a_0 + \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{p_j \in D_j} \left(a_{p_j} \cos \left(\sum_{i=1}^m k_i^j \omega_i t \right) + b_{p_j} \sin \left(\sum_{i=1}^m k_i^j \omega_i t \right) \right), \quad (1)$$

где a_0 , а также при любом $p_j \in D_j$, a_{p_j} , b_{p_j} – n -мерные векторы. Множество

$D_j = \left\{ p_j : p_j = (k_1^j, \dots, k_m^j), \sum_{i=1}^m k_i^j = j, j \in \mathbf{N}, k_i^j \in \mathbf{Z}^* \right\}$, где $m \in \mathbf{N}$ некоторое фиксированное

число, \mathbf{Z}^* – множество целых неотрицательных чисел. Спектр $W = \left\{ 0, \sum_{i=1}^m k_i^j \omega_i \right\}$, $\omega_i \in \mathbf{R}^+$,

$i = \overline{1, m}$ – несоизмеримые числа.

Символом $M(W)$ обозначим множество тригонометрических рядов, вида

$$y(t) = c_0 + \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{p_j \in D_j} \left(c_{p_j} \cos \left(\sum_{i=1}^m k_i^j \omega_i t \right) + d_{p_j} \sin \left(\sum_{i=1}^m k_i^j \omega_i t \right) \right),$$

где c_0 , а также при любом $p_j \in D_j$, c_{p_j} , d_{p_j} – n -мерные векторы. Нулевым элементом множества $M(W)$ назовем ряд с нулевыми коэффициентами. Множество $M(W)$ замкнуто относительно операций сложения, умножения на число и на матрицу.

Мультипериодические функции

Пусть функция $g(t)$ – непрерывная периодическая функция с основным периодом $T > 0$, $\ell \in \mathbf{R}^+$, $a_0 \in \mathbf{R}$, $k \in \{0, 1, 2, \dots\}$, $a_{k+1} = a_k + \ell^k$, тогда функцию вида

$$y(t) = g\left(\frac{t - a_k T}{\ell^k}\right), \quad t \in [a_k T; a_{k+1} T] \quad (2)$$

назовем мультипериодической функцией.

Символом $V(T)$ обозначим множество функций вида (2). Нулевым элементом множества $V(T)$ будет функция $y(t) = 0$, $t \in \mathbf{R}$. Множество $V(T)$ замкнуто относительно операций сложения, умножения на число и на матрицу.

Приведем пример такой функции.

Пусть $g(t) = \sin t$, $T = 2\pi$, $a_0 = 0$, $\ell = 2$, тогда $a_{k+1} = a_k + 2^k$. Получим

$$y(t) = \begin{cases} \sin t, & t \in [0; 2\pi], \quad k = 0, \\ \sin\left(\frac{t - 2\pi}{2}\right), & t \in [2\pi; 6\pi], \quad k = 1, \\ \sin\left(\frac{t - 6\pi}{4}\right), & t \in [6\pi; 14\pi], \quad k = 2, \\ \sin\left(\frac{t - 14\pi}{8}\right), & t \in [14\pi; 30\pi], \quad k = 3 \\ \dots \end{cases}$$

Системы линейных дифференциальных уравнений

Для систем линейных дифференциальных уравнений

$$\frac{dx}{dt} = A(t)x, \quad (3)$$

с непрерывной или кусочно-непрерывной на $(-\infty; +\infty)$ периодической матрицей $A(t)$:

$$A(t + \omega) = A(t), \quad (\omega > 0)$$

справедлива теорема Флоке.

Теорема Флоке. Для линейной системы (3) с ω -периодической матрицей нормированная при $t = 0$ фундаментальная матрица решений (матрициан) имеет вид

$$X(t) = \Phi(t)e^{\Lambda t},$$

где $\Phi(t)$ – класса C^1 (или кусочно-гладкая) ω -периодическая неособенная матрица, причем $\Phi(0) = E$, и Λ – постоянная матрица.

Следовательно, структура решений системы (3) вполне определяется матрицей монодромии $X(\omega)$. Корни ρ_j характеристического уравнения $\det(X(\omega) - \rho E) = 0$, называются мультипликаторами.

Известно [3], что линейная однородная периодическая система устойчива тогда и только тогда, когда все ее мультипликаторы расположены внутри замкнутого единичного круга $|\rho| \leq 1$, причем мультипликаторам, лежащим на окружности $|\rho| = 1$, соответствуют простые элементарные делители. Для асимптотической устойчивости необходимо и достаточно, чтобы все мультипликаторы находились внутри единичного круга, $|\rho| < 1$.

Одним из пунктов программы работ по анализу устойчивости системы линейных дифференциальных уравнений будет попытка формулировки и доказательства теоремы ана-

логичной теореме Флоке, для системы с квазипериодическими и (или) мультипериодическими коэффициентами.

Теорема Флоке дает общий критерий ограниченности решений системы линейных дифференциальных уравнений с периодическими коэффициентами. Для определения корней характеристического уравнения ρ_j необходимо знать матрицу монодромии $X(\omega)$, то есть в конечном счете нужно уметь получать решение системы (3). Однако, такую задачу чаще всего не удастся решить, и следовательно, получение новых признаков представляет собой, актуальную задачу, имеющую значительный интерес как для фундаментальных исследований, так и для конкретных приложений.

Можно показать, что условия устойчивости тривиального решения системы (3) определяются системой неравенств, связывающих коэффициенты характеристического уравнения матрицы $X(\omega)$. Поэтому иногда достаточно знать лишь приближенные значения этих коэффициентов. Это позволяет использовать различные приближенные методы интегрирования системы (3) и нахождения собственных значений матрицы монодромии.

Чтобы обойти трудности, связанные с отсутствием способов точного определения коэффициентов характеристического уравнения матрицы монодромии, на коэффициенты исходной системы (3) стремятся наложить ограничения, позволяющие гарантировать расположение мультипликаторов, необходимое и достаточное для устойчивости.

Также, одним из пунктов программы работ будет попытка с помощью принципа максимума Понтрягина [4] получить достаточные условия устойчивости и неустойчивости системы линейных дифференциальных уравнений с квазипериодическими и (или) мультипериодическими коэффициентами. Эти условия должны быть эффективными, то есть легко проверяемыми и удобными для анализа реальной физической системы, описываемой с помощью дифференциальных уравнений. Предполагаются известными некоторые доступные характеристики квазипериодических и (или) мультипериодических коэффициентов системы. Под доступными характеристиками, будем понимать характеристики, которые

- просто определяются на практике,
- их количества достаточно для решения задачи об устойчивости.

Библиографический список

1. Ляпунов А. М. Общая задача об устойчивости движения. Собрание сочинений, т.2 – Москва, Ленинград: Издательство АН СССР, 1956.
2. Якубович В. А., Старжинский В. М. Линейные дифференциальные уравнения с периодическими коэффициентами. – Москва: Издательство «Наука», 1972.
3. Демидович Б. П. Лекции по математической теории устойчивости. – Москва: Издательство «Наука», 1967.
4. Понтрягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкрелидзе Р. В., Мищенко Е. Ф. Математическая теория оптимальных процессов, Москва: Издательство «Наука», 1976.

УДК 524; ГРНТИ 41.17.41

ПОГЛОЩЕНИЕ И РАССЕЯНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ЧЕРНЫМИ ДЫРАМИ

П.С. Свиридов

Волгоградский государственный университет,
Российская Федерация, Волгоград, pmfb-211_489928@volsu.ru

Аннотация. Приведено решение задачи о рассеянии невращающейся незаряженной черной дырой сверхнизкочастотной электромагнитной волны. Найден угловой спектр мощности рассеянных электромагнитных волн. Показано, что имеет место эффективное поглощение черной дырой волн с длиной сравнимой с гравитационным радиусом черной дыры. Указаны возможности наблюдения эффекта рассеяния сверхнизкочастотных электромагнитных волн на черных дырах звездных и промежуточных масс.

Ключевые слова: поглощение и рассеяние радиоволн, теория Ми, криволинейное пространство-время, черные дыры.

ABSORPTION AND SCATTERING OF LOW-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC WAVES BY BLACK HOLES

P.S. Sviridov

Volgograd State University,
Russia, Volgograd, pmfb-211_489928@volsu.ru

The summary. The solution of the problem of scattering of an ultra-low-frequency electromagnetic wave by a non-rotating uncharged black hole is presented. The angular power spectrum of scattered electromagnetic waves is found. It is shown that there is an effective absorption by the black hole of waves with a length comparable to the gravitational radius of the black hole. The possibilities of observing the effect of scattering of ultra-low-frequency electromagnetic waves on black holes of stellar and intermediate masses are indicated.

Keywords: absorption and scattering of radio waves, Mie theory, curved space-time, black holes.

Введение

Определение природы темной материи считается одной из ключевых задач не только современной астрофизики, но и физики в целом. Несмотря на большие усилия по поиску гипотетических кандидатов в строительный материал темной материи – слабовазаимодействующих массивных частиц – вимпов, эти частицы до сих пор не обнаружены, и высказываются сомнения в том, что они действительно существуют [1]. Определенные надежды возлагаются на гипотетические сверхлегкие частицы – аксионы, однако, наблюдательные свидетельства в пользу их существования также отсутствуют [2]. Имеются теории, отвергающие сам факт материального происхождения темной материи и претендующие на разрешение проблемы скрытой массы в рамках концепции модифицированной гравитации [3], однако сама концепция подвергается резкой критике. В этой связи приобретает популярность реинкарнированная идея о доминирующем вкладе в темную материю массивных темных компактных объектов макроскопических размеров (МАСНО), основными кандидатами на роль которых выступают нейтронные звезды и черные дыры (ЧД) звездных или промежуточных масс (сверхмассивные ЧД были бы сразу заметны). Проект МАСНО, проводившийся в 1990-е гг. и направленный на поиск темных объектов по их гравитационному линзированию, не подтвердил необходимого для объяснения наличия темной материи количества объектов МАСНО в интервале от миллионных долей до 100 солнечных масс [4]. Однако, наблюдения проводились в оптическом диапазоне, в то время как наиболее интенсивно интерференционные эффекты при рассеянии проявляют себя, когда длина волны электромагнитного излучения сопоставима с размером космического тела, что для ЧД звездных масс составляет 3-100 км. Для наблюдения такого низкочастотного излучения требуются радиотелескопы гигантских размеров. Отметим, что в последнее годы активно обсуждаются идеи строительства крупных радиотелескопов космического базирования как на орбите Земли, так и на поверхности обратной к Земле стороне Луны [5]. С учетом ускоряющегося темпа космических работ в области многоцветных носителей и резко возрастающих возможностей по увеличению объемов и масс выводимой на орбиту полезной нагрузки перспективы начала реализации проектов по развертыванию космических радиотелескопов в 2030-40-е гг. выглядят реалистичными.

В пользу гипотезы МАСНО свидетельствуют многочисленные ($\sim 10 \text{ год}^{-1}$) акты регистрации детекторами LIGO гравитационно-волновых всплесков, из которых почти все объясняются продуктом слияния двух ЧД массами в 8-80 солнечных или слияния ЧД и нейтронной звезды. На момент написания настоящих тезисов (27 февраля 2025 г.) было зарегистрировано всего 182 события, из них подавляющее большинство отвечают слиянию объектов в указанном диапазоне масс [6].

В настоящей работе мы развиваем методику построения решения уравнений Максвелла в криволинейном пространстве-времени в сферически симметричном стационарном

гравитационном поле невращающейся ЧД в метрике Шварцшильда. Для плоского трехмерного случая теория рассеяния света на сферических частицах, размеры которых могут быть порядка или больше длины волны, была разработана Г. Ми в 1908 г. [7]. В искривленном пространстве-времени все обстоит сложнее из-за возникающих математических трудностей. На протяжении последних десятилетий к решению данной задачи исследователи подходили с различных позиций, однако, все приемы основывались на тех или иных приближениях (малость длины волны, рассмотрение светового потока движением пучка квантов и т.п.) [8-11]. В настоящей работе мы предлагаем точное решение уравнений Максвелла в ОТО. Точное решение позволит построить функцию рассеяния радиоволн на ЧД и тем самым оценить долю диффузной (рассеянной) компоненты низкочастотного радиоизлучения на тех или иных длинах волн. Последнее дает возможность провести оценку количества рассеивающих гравитационных источников размерами 3-100 км в Галактике.

Модель рассеяния электромагнитной волны в гравитационном поле ЧД в метрике Шварцшильда. Результаты решения задачи рассеяния

При изложении модели следуем нашей работе [12]. Для описания распространения электромагнитной волны в метрике Шварцшильда мы пользуемся уравнениями Максвелла в ковариантной форме. Структура волнового поля для 4-потенциала описывается волновым уравнением [13]:

$$\nabla^\beta \nabla_\beta A^\alpha = 0,$$

символ ∇ здесь означает ковариантную производную. Решение в силу сферической симметрии гравитационного поля ищем разложением по сферическим гармоникам [14, 15]

$$A^\alpha = \left(A^0 Y, A^1 Y, A^{22} \frac{\partial Y}{\partial \theta} + A^{23} \frac{\partial Y}{\sin \theta \partial \varphi}, -A^{23} \frac{\partial Y}{\sin \theta \partial \theta} + A^{22} \frac{\partial Y}{\sin^2 \theta \partial \varphi} \right),$$

где A^0, A^1, A^{22}, A^{23} суть функции радиуса r . В результате получаем систему четырех линейных с переменными коэффициентами ОДУ 4-го порядка:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 A^0}{dr^2} + \frac{2}{r-r_g} \frac{dA^0}{dr} - \frac{l(l+1)}{r(r-r_g)} A^0 + \frac{\omega^2 r^2}{c^2 (r-r_g)^2} A^0 + \frac{i\omega r_g r}{c(r-r_g)^3} A^1 &= 0, \\ \frac{d^2 A^1}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dA^1}{dr} - \frac{2}{r^2} A^1 - \frac{l(l+1)}{r(r-r_g)} A^1 + \frac{\omega^2 r^2}{c^2 (r-r_g)^2} A^1 + \frac{i\omega r_g}{cr(r-r_g)} A^0 + \frac{2l(l+1)}{r} A^{22} &= 0, \\ \frac{d^2 A^{22}}{dr^2} + \frac{4r-3r_g}{r(r-r_g)} \frac{dA^{22}}{dr} + \frac{2-l(l+1)}{r(r-r_g)} A^{22} + \frac{\omega^2 r^2}{c^2 (r-r_g)^2} A^{22} + \frac{2}{r^2 (r-r_g)} A^1 &= 0, \\ \frac{d^2 A^{23}}{dr^2} + \frac{4r-3r_g}{r(r-r_g)} \frac{dA^{23}}{dr} + \frac{2-l(l+1)}{r(r-r_g)} A^{23} + \frac{\omega^2 r^2}{c^2 (r-r_g)^2} A^{23} &= 0, \end{aligned}$$

здесь r_g - гравитационный радиус.

Граничные условия на горизонте событий задаются как условие гладкости решения (следствие того, что сингулярность на горизонте – устранимая). Технически это условие реализуется как отбор из двух асимптотических на горизонте решений конечного и отбрасывание расходящегося решения. Интегрирование системы ОДУ производится от внутренней границы вблизи горизонта событий до внешней границы методом Рунге-Кутты. Поле на внешней границе (в расчетах радиус внешней границы принят равным 100 длинам волн, но не менее 100 гравитационных радиусов) раскладывается на падающую и отраженную волны, что позволяет вычислить амплитудный и энергетический коэффициенты отражения. Функция рассеяния строится взвешенной суперпозицией отраженных волн. По известному рас-

пределению 4-потенциала можно восстановить векторы электромагнитного поля как соответствующие компоненты тензора электромагнитного поля $F_{ik} = \nabla_i A_k - \nabla_k A_i$. Например, для 3-вектора \mathbf{E} имеем $E_\alpha = F_{0\alpha}$ [16]. Поле на внешней границе раскладывается на падающую, E_{in} , и отраженную, E_{out} , волны, что позволяет вычислить амплитудный коэффициент отражения $R = E_{out} / E_{in}$; здесь E — поперечная компонента поля. Угловой спектр мощности электромагнитных возмущений рассеянной волны строится как зависимость энергетического коэффициента отражения $|R|^2$ от l при фиксированном значении “оптического” параметра $\tilde{\omega} = \omega r_g / c$. Рисунок 1 демонстрирует зависимость $|R|^2$ от $\tilde{\omega}$ для различных l . Те возмущения, которые проникают под горизонт, наружу, естественно, не отражаются, однако, большая часть возмущений в коротковолновой части спектра отражается еще далеко до подхода к горизонту. Показано, что имеет место эффективное поглощение ЧД длинноволновых возмущений с длиной волны сравнимой с размером горизонта событий. Для ЧД звездных масс это задает длины волн 10-100 км или, соответственно, частоты 3-30 кГц, что лежит в диапазоне *сверхнизкочастотного* излучения. Под низкочастотным излучением в радиоастрономии обычно понимают излучение с частотами <30 МГц [17]. Под сверхнизкочастотным мы предлагаем понимать излучение с частотами < 30 кГц.

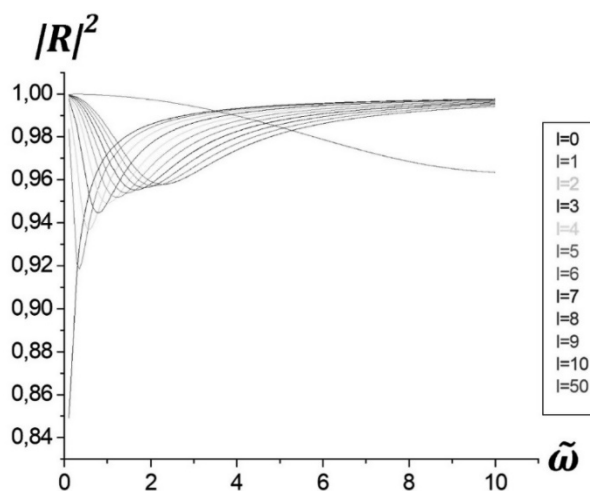


Рис. 1. Частотные зависимости энергетического коэффициента отражения для волн с различным волновым (мультипольным) числом l . Кривые располагаются снизу вверх в порядке возрастания l . Частота нормирована на гравитационный радиус и скорость света

О возможности наблюдений рассеянного сверхнизкочастотного электромагнитного излучения в Галактике

Возможности наблюдений рассматриваемого сверхнизкочастотного электромагнитного излучения сильно ограничены, но не невозможны в принципе.

При наблюдениях наземными радиотелескопами принимаемое излучение ограничено длиной волны ~ 10 м, более длинные волны не пропускаются ионосферой.

Экранирование низкочастотных электромагнитных волн космической плазмой возникает на частотах равных частоте плазменных колебаний в межзвездной среде или меньших. Для характерных значений концентрации электронной плазмы в 0.1 см^{-3} в «теплом» межоблачном межзвездном газе граница прозрачности начинается с длины волны 110 км. Это означает, что интенсивное рассеяние в интересующем нас диапазоне источников с размерами 3-100 км может потенциально может быть наблюдаемо. Отметим, что эксперименты с детек-

тированием излучения вплоть до частот в десятки доли кГц на космических аппаратах уже проводятся [18].

Радиоастрономия на сверхдлинных радиоволнах фактически только начинает формироваться, объем наблюдений чрезвычайно мал, а природа источников сверхнизкочастотного излучения до конца не ясна. Потенциальными источниками могут быть авроральное километровое излучение ионосфер планет и их спутников, радиозлучение, вызываемое взаимодействием космических лучей и нейтрино с поверхностями планет и их спутников, космологическое излучение, сформировавшееся в эпоху между рождением реликтового излучения и формированием первых звезд и галактик (Dark Ages), существенно сдвинутое по частоте за счет эффекта Доплера [17]. Добавим к этому возможность регистрации фона от космических молний, которые гипотетически могут существовать в многофазной межзвездной среде. В целом интенсивность такого сверхнизкочастотного излучения ожидается как минимум на 8 порядков (а скорее, существенно больше) ниже, чем интенсивность реликтового микроволнового излучения в максимуме его спектра [19].

Заключение

1. Приведено решение задачи о рассеянии сферических электромагнитных волны в гравитационном поле невращающейся черной дыры. Найден угловой спектр мощности рассеянных электромагнитных волн. Показано, что имеет место эффективное поглощение ЧД волн с длиной сравнимой с размером горизонта событий.

2. Электромагнитные волны не пропускаются космической плазмой при частотах волны ниже пороговой, равной частоте плазменных колебаний. Для электронной плазмы в межзвездной среде с типичной концентрацией 0.1 см^{-3} окно непрозрачности начинается с длины волны 110 км. Это означает, что ожидаемый максимум диффузной (рассеянной) компоненты излучения в интересующем нас диапазоне размеров рассеивающих источников в 3-100 км в принципе может быть наблюдаем с помощью перспективных радиотелескопов космического базирования.

Библиографический список

1. Biron, L. LZ Experiment Sets New Record in Search for Dark Matter // News from Berkeley Lab. August 26, 2024. <https://newscenter.lbl.gov/2024/08/26/lz-experiment-sets-new-record-in-search-for-dark-matter/>.
2. Choi, K., Im, S.H., Sub Shin, C. Recent Progress in the Physics of Axions and Axion-Like 354 Particles// Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. – 2021. – V.71. – P.225-252. DOI:10.1146/annurev-nucl-120720-031147.
3. Banik, I., Zhao, H. From Galactic Bars to the Hubble Tension: Weighing Up the Astrophysical Evidence for Milgromian Gravity// Symmetry. – 2022. – V.14, Issue 7. – P.1331. DOI: 10.3390/sym14071331.
4. Tisserand, P. et al. Limits on the Macho Content of the Galactic Halo from the EROS-2 Survey of the Magellanic Clouds// Astron. Astrophys. – 2007. – V.469. – P.387-404. DOI: 10.1051/0004-6361:20066017.
5. Lunar Crater Radio Telescope: Illuminating the Cosmic Dark Ages. <https://www.nasa.gov/solar-system/lunar-crater-radio-telescope-illuminating-the-cosmic-dark-ages/>
6. Gravitational Wave Open Science Center. Event List // <https://gwosc.org/eventapi/html/allevnts/>
7. Mie, G. Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen. Ann. der Phys. 1908, 330, 377–445.
8. Futterman, J.A.H., Handler, F.A., Matzner, R.A.. Scattering from black holes. Cambridge University Press, Cambridge, 1988. – 192 pp.
9. Новиков, И.Д., Фролов, В.П. Физика черных дыр. – М.:Наука, 1986. – 328 с.
10. Handler, F.A., Matzner, R.A. Gravitational wave scattering // Physical Review D. – 1980. – Vol. 22. – P. 2331–2348.
11. Sanchez, N. Elastic scattering of waves by a black hole // Phys. Rev. D. – 1978. – Vol. 18, Iss. 6. – P. 1798–1804.
12. Свиридов, П.С. Рассеяние низкочастотных электромагнитных волн на черной дыре / П.С. Свиридов // Препринты трудов 52-й Международной студенческой научной конференции [Электронный ресурс]. — г. Екатеринбург: УрФУ, 2025. — С.189-192. — Режим доступа: <https://astro.insma.urfu.ru/school/conference52/preprint>. — Дата доступа: 27.02.2025.
13. Мизнер, Ч., Торн, К., Уилер, Дж. Гравитация, Т.1. – М.:Мир, 1977. – 474 с.
14. Kovalenko, I.G., Eremin, M.A. Instability of spherical accretion I. Shock-free Bondi accretion // Mon. Not. R. Astron. Soc. – 1998. – Vol. 298. – P. 861–870.

15. Борен, К., Хафмен, Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. – М.: Мир, 1986. – 664 с.
16. Ландау, Л.Д., Лифшиц, Е.М. Теория поля. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.
17. Klein Wolt, M. et al. Radio astronomy with the European Lunar Lander: Opening up the last unexplored frequency// Planetary and Space Science. – 2012. – V.74, Iss.1. – P. 167-178.
18. Yan, J. et al. Ultra-Low-Frequency Radio Astronomy Observations from a Selenocentric Orbit. First results of the Longjiang-2 experiment // Experimental Astronomy. – 2023. – Vol. 56, Iss. 1. – P. 333– 353.
19. Henry, R.C.. Diffuse background radiation//Astrophys. J. – 1999. – V.516. – P. L49–L52.

УДК 517.929.4. ГРНТИ 27.31.19

КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ ЛА-САЛЛЯ

А.С. Есенкина¹, А.И. Заика², А.А. Лобов³, А.В. Никифорова⁴, Вал.В. Миронов⁵
Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, ¹asyaesenkina.05@gmail.com, ²sashazaika32@gmail.com,
³lobovaleksandr62@yandex.ru, ⁴nikiforovaav05@mail.ru, ⁵mironov1vv@mail.ru

Аннотация. В работе В.В. Миронова и Ю.С. Митрохина «технологический подход к исследованию устойчивости динамических систем: прикладные вопросы» говорится об исследовании устойчивости решений уравнения Ла-Салля, которые являются важным в различных прикладных областях, таких как физика, биология и сейсмология. Основное внимание уделяется анализу устойчивости динамических систем и поиску областей асимптотической устойчивости. В данной работе рассматривается область асимптотической устойчивости системы Ла-Салля и поиск зависимости между устойчивостью системы и поведение его основных характеристик (кривизны и кручения). При помощи программного обеспечения MatLab, Excel и Python (с использованием сторонних библиотек таких как numpy, matplotlib.pyplot и др.) проведен анализ основных характеристик кривых методом экспоненциальной подгонки, FFT-анализа спектра Фурье, визуального анализа графиков характеристик.

COMPUTER ANALYSIS OF THE STABILITY OF LA SALLE'S SYSTEM SOLUTION

A.S. Esenkina¹, A.I. Zaika², A.A. Lobov³, A.V. Nikiforova⁴, V.V. Mironov⁵
Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, ¹asyaesenkina.05@gmail.com, ²sashazaika32@gmail.com,
³lobovaleksandr62@yandex.ru, ⁴nikiforovaav05@mail.ru, ⁵mironov1vv@mail.ru

The summary. In the work by V. V. Mironov and Yu. S. Mitrokhin, titled "Technological Approach to the Study of Stability of Dynamical Systems: Applied Issues," the stability of solutions to the La Salle equation is investigated. These solutions are significant in various applied fields such as physics, biology, and seismology. The primary focus is on the analysis of the stability of dynamical systems and the search for regions of asymptotic stability. This study examines the region of asymptotic stability of the La Salle system and explores the relationship between the system's stability and the behavior of its main characteristics (curvature and torsion). Using software tools such as MatLab, Excel, and Python (with third-party libraries like numpy and matplotlib.pyplot), an analysis of the main characteristics of the curves was conducted. Methods included exponential fitting, FFT analysis of the Fourier spectrum, and visual analysis of characteristic graphs.

Введение

Принципом инвариантности обычно называют теорему Ла-Салля, в которой требование к производной функции Ляпунова ослаблено настолько, насколько это возможно в прямом методе Ляпунова исследования устойчивости автономных систем дифференциальных уравнений. А именно, предполагается, что эта производная неположительна и может принимать нулевые значения вне положения равновесия системы. Вывод, который можно при этом сделать, состоит в том, что ω -предельное множество ограниченного решения системы при-

надлежит множеству нулей производной функции Ляпунова. Дополнительный анализ этого множества позволяет делать выводы об асимптотической устойчивости положения равновесия системы так, как сделано в известной теореме Барбашина – Красовского [1, 2]

Уравнение Ла-Салля и оценка его области устойчивости

К классическим уравнениям можно отнести и уравнение Ла-Салля. Само уравнение имеет вид:

$$\ddot{x} + a\dot{x} + 2bx + cx^2 = 0 \quad a, b, c > 0, \quad (1)$$

при этом параметр $b > a$ (2) (это условие соответствует «физике» реальных задачах, параметр b «тяжелее» параметра a). Подобные уравнения возникают и исследуются в физике, в биологии, в сейсмологии, например, для моделирования геологических разломов. Заметим, что уравнение (1) не подпадает под традиционный вид уравнения (1), ввиду того, что функция $g(x) = 2bx + cx^2$ не является нечетной. Тем не менее, анализ устойчивости его решения можно провести в рамках общего уравнения Лъенара, рассмотренного в п.1 настоящей статьи. Методика допускает и прямое обращение к этому уравнению.

Действительно, уравнение (1) равносильно системе второго порядка

$$\begin{cases} \dot{x} = y, \\ \dot{y} = -2bx - ay - cx^2. \end{cases} \quad (3)$$

Снова (теперь уже традиционно) рассмотрим с учетом вида системы (2) функцию ляпуновского типа

$$L(x, y) = \begin{vmatrix} \dot{x} & \dot{y} \\ \ddot{x} & \ddot{y} \end{vmatrix} = -4b^2x^2 - (2ab)xy - 2by^2 + L_2(x, y) \quad (4)$$

где $L_2(x, y)$ – функция от соответствующих переменных (и параметров), имеющая вблизи нуля более высокий порядок малости, чем 2. Для целей исследования по виду функции (4) определим функцию

$$\Lambda(x, y) = 4b^2x^2 + (2ab)xy + 2by^2. \quad (5)$$

Одновременно функция

$$\Phi(x, y) = \dot{\Lambda}(x, y) = -4ab^2x^2 - 2a^2bxy - 2aby^2 + \Phi_2(x, y), \quad (6)$$

где $\Phi_2(x, y)$ – функция от соответствующих переменных (и параметров), имеющая вблизи нуля более высокий порядок малости, чем 2.

Заметим, что вид функции ляпуновского типа (3) не зависит от параметра c , входящего в уравнение (1). Это говорит о том, что исследование устойчивости решения уравнения (1) можно было проводить классическим способом по первому (линейному) приближению. Предложенная методика позволяет получить результат большей общности. Положим, для упрощения ситуации, ввиду замечания о параметре, что в уравнении (1) $c=3$. При определенном соотношении параметров, а именно $8b > a^2$, что заведомо выполнено, если учесть условие (2), в некоторой окрестности $W(O)$ центра O фазовой плоскости $\mathbf{R}^2 = (xOy)$ функции

$$\Lambda(x, y) > 0 \text{ и } \Phi(x, y) < 0. \quad (7)$$

И, значит, имеет место асимптотическая устойчивость точки покоя уравнения (1).

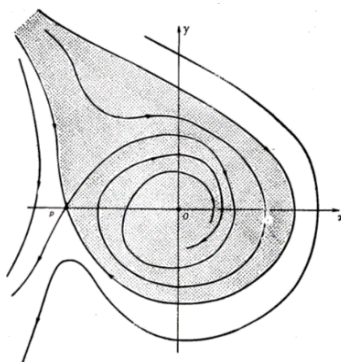


Рис. 1. Заштрихованная площадь является областью асимптотической устойчивости

Классические методы геометрии позволяют найти такое число $l > 0$, что везде внутри эллипса, задаваемого неравенством $-4b^2x^2 - (2ab)xy - 2by^2 < l$ функция $\Lambda(x, y) > 0$, а функция $\Phi(x, y) < 0$. Компьютерное моделирование решения системы неравенств (7) при значениях параметров $a=1, b=1, c=3$ позволило найти это число $l > 0$ и тем увеличить площадь области асимптотической устойчивости почти в 1,5 раза. (Под областью асимптотической устойчивости понимается односвязное открытое множество, содержащее начало координат, такое, что всякое движение, начинающееся в этой области асимптотически стремится к началу координат при $t \rightarrow \infty$.)

Одновременно заметим, что задача доказательства неограниченности области устойчивости уравнения (1), хотя бы при значениях $a=1, b=1, c=3$, осталась нерешенной. Ее решение связано с учетом особенностей поведения членов высокого порядка в функциях $L_2(x, y)$ и $\Phi_2(x, y)$, и пока не поддается анализу [3].

Постановка задачи

В дифференциальной геометрии кривизна и кручение являются фундаментальными характеристиками кривых в пространстве. Кривизна и кручение кривых, описывающих траектории системы, могут отражать особенности динамики системы. Например, резкие изменения кривизны или кручения могут указывать на наличие неустойчивостей или бифуркаций.

Пусть $k(s)$ и $\kappa(s)$ — гладкие функции и $k(s) > 0$. Тогда существует и притом единственная (с точностью до движения в \mathbb{R}^3) бигулярная пространственная кривая $\gamma(s) = (x(s), y(s), z(s))$, параметризованная гладким параметром s , такая, что функции $k(s)$ и $\kappa(s)$ являются ее кривизной и кручением соответственно [4].

На основе двух этих утверждений можно выдвинуть гипотезу: зная поведение кривизны и кручение кривой, можно судить о ее асимптотической устойчивости.

Для проверки гипотезы о связи плавности изменений кривизны и кручения с устойчивостью системы было проведено численное моделирование решений уравнений Ла-Салля.

О методах

В работе кривизна и кручение рассчитаны методом векторного анализа с помощью внутренних функций MatLab. При анализе графиков использованы методы подгонки функции: линейной, синуса и экспоненты, а также быстрое преобразование Фурье (FFT-анализ) для анализа колебаний графика путем разложения в спектр гармоник.

В программе MatLab, выбранной в качестве инструмента для проведения исследований, было выполнено построение решения системы Ла-Салля в двумерной и трехмерной проекции. Видно, что система состоит из трех типов кривых (рис. 2), один из которых нахо-

дится в области асимптотической устойчивости. Обозначим их номерами от I до III; I – находится в области асимптотической устойчивости (соответственно, кривые этого типа являются устойчивыми), а II и III не входят в данную область, а значит устойчивыми не являются.

Для анализа возьмём по две кривых каждого типа, две параметрически заданных кривых (одну асимптотически устойчивую, вторую - неустойчивую) и исследуем каждую по отдельности. Аналогичная представленной программа строит только одну кривую, получая на вход координаты x, y ее начала, границы моделирования (по z) и массив с вещественными числами, не выходящих за пределы границ моделирования. Данный массив используется для квантования кривой и расчета кривизны и кручения в квантованных точках. Уровни квантования можно изменять, вводя числа в массив через запятую. Программа строит заданную кривую и красную прямую (ось z). Далее квантует ось z в точках, указанных в массиве, и строит из них перпендикулярные оси z зеленые прямые, соединяющие спираль с осью z . В точках пересечения со спиралью программа вычисляет кривизну и кручение методом векторного анализа.

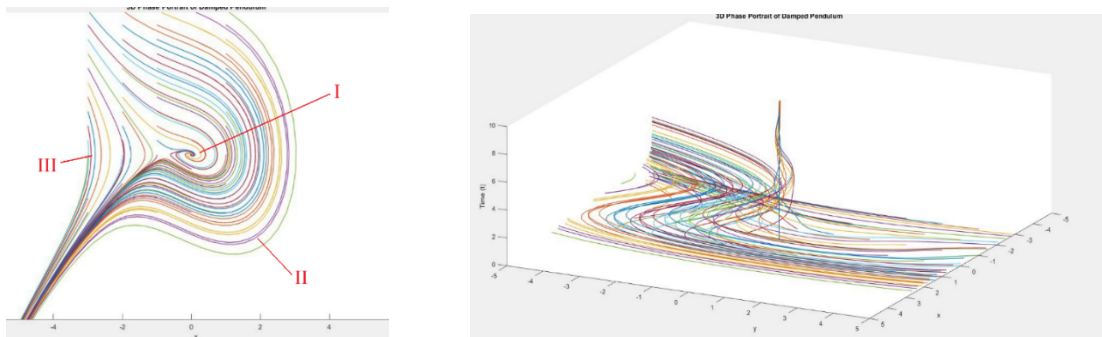


Рис. 2. Построение решений. Здесь видно поведение каждого типа кривых, заметна область устойчивости

Гипотезу проверим следующим образом: примем за эталон асимптотически устойчивой кривую I типа, рассчитаем кривизну и кручение в нескольких точках на ней и проанализируем их поведение. Подобным образом проанализируем параметрически заданную устойчивую кривую и сравним результаты анализа. Далее совершим аналогичные действия с параметрически заданной устойчивой кривой и кривыми II и III типа. То есть проанализируем две условные группы кривых. Гипотезу будем считать подтвержденной в случае, если результаты устойчивых кривых будут различны с результатами неустойчивых кривых, притом будут схожи и/или иметь наблюдаемую закономерность и взаимосвязь с результатами из своей группы.

Устойчивые кривые. Кривые I типа

Кривые данного типа немонотонно стремятся к нулю (рис. 3).

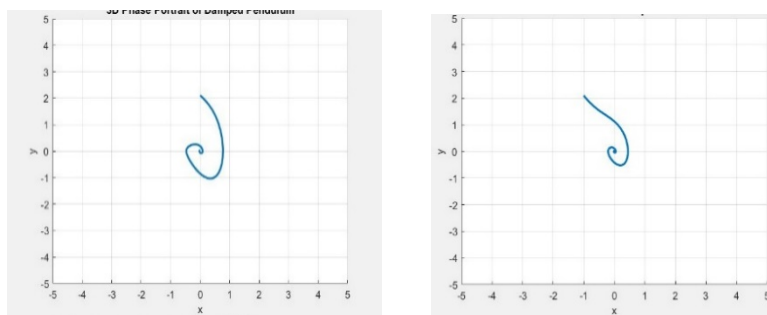


Рис. 3. Примеры кривых I типа

При анализе будем сравнивать ее с монотонно сходящейся кривой, заданной системой:

$$\begin{cases} x = \frac{1}{t} \cos(t), \\ y = \frac{1}{t} \sin(t), \\ z = t. \end{cases} \quad (8)$$

Далее для краткости будем называть данную кривую *параметрической* (рис. 4).

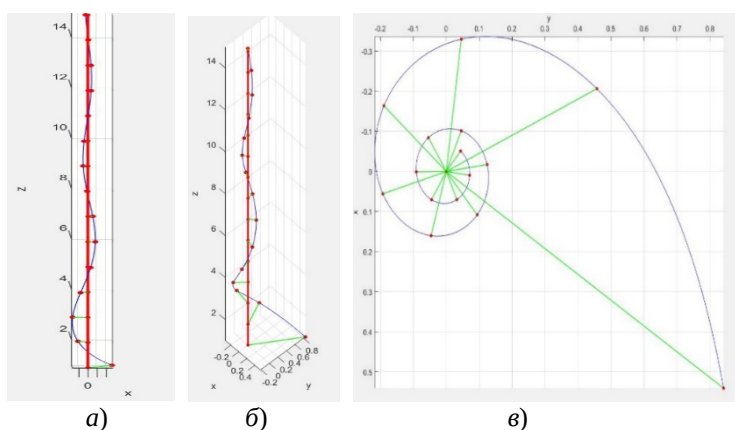


Рис. 4. Кривая, заданная уравнением (8) - параметрическая устойчивая:
а) – проекция на плоскость XZ; б) – перспектива; в) – проекция на плоскость XY

Двухмерное и трехмерное построения данной кривой максимально схожи с кривыми I типа. Справедливо предположить, что кривизна и кручения параметрической кривой будут схожи с кривизной и кручением кривой I типа. Квантование всех спиралей производится на отрезке $[0,15]$ с шагом 1.

Поведение графиков кривых I типа и параметрической схожи (рис. 5), графики кривизны имеют «всплески», связанные с неравномерностью самой спирали, их характер схож с экспоненциальным убыванием, что подтверждается экспоненциальной подгонкой: коэффициенты R^2 равны 0,8243 и 0,797, что значительно меньше, чем у параметрической спирали (0,9564) и говорит о меньшем соответствии данной модели экспоненциальному убыванию.

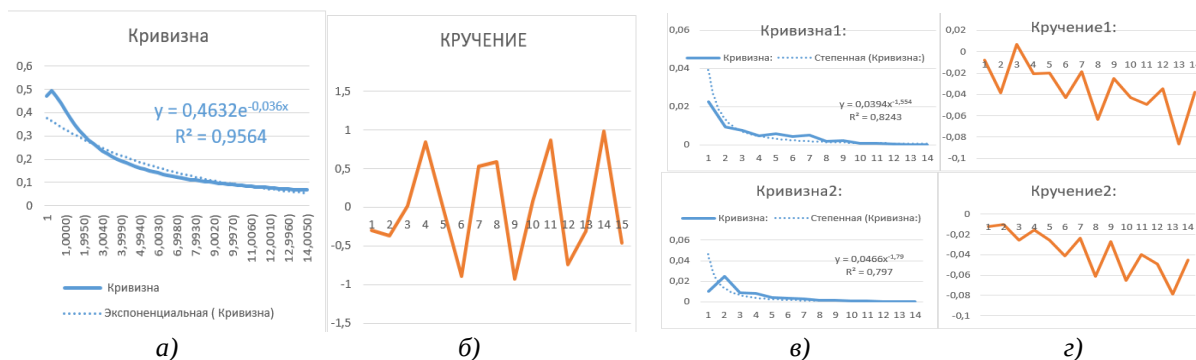


Рис. 5. Графики кривизны и кручения для кривых:
а) – кривизна параметрической кривой; б) – кручение параметрической кривой;
в) – кривизна кривых I типа; з) – кручение кривых I типа

Графики кручения совершают колебания, диапазон которых постепенно смещается вниз у обеих спиралей. Характер графика кривизны похож на экспоненциальное убывание. График кривизны параметрической спирали колеблется вокруг оси x . Порядки кривизны кручений обеих спиралей схожи друг с другом, но гораздо меньше в сравнении со сходящейся параметрической спиралью (рис. 6).

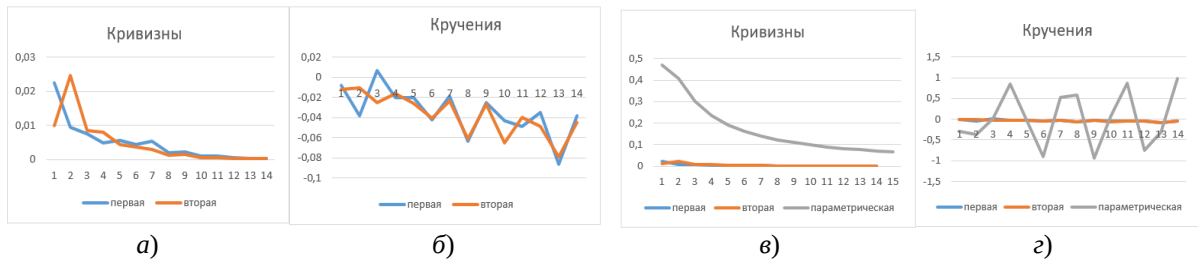


Рис. 6. Сравнение порядков кривизны и кручения кривых:
 а) – сравнение порядков кривизны кривых I типа друг с другом;
 б) – сравнение порядков кручения кривых I типа друг с другом;
 в) – сравнение порядков кривизны кривых I типа с параметрической;
 г) – сравнение порядков кручения кривых I типа с параметрической

Увеличим частоту квантования для более точного анализа. График кривизны имеет «всплеск» в начале, затем убывает. Убывание стало еще меньше похоже на экспоненциальное. Коэффициент детерминации $R^2=0,7167$ и $R^2=0,7259$, что говорит о плохом соответствии данной модели экспоненциальному убыванию (рис. 7).

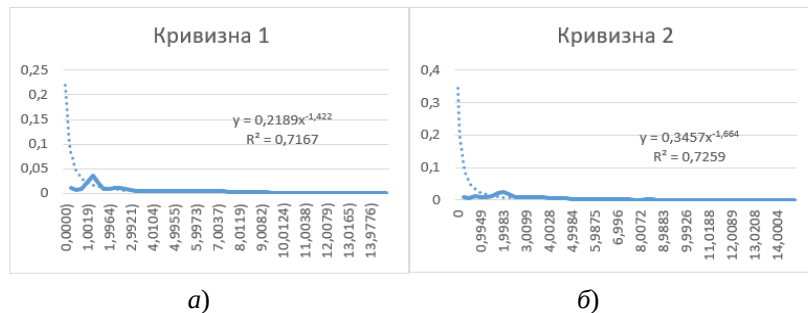


Рис. 7. Экспоненциальная подгонка графиков кривизны двух кривых I типа:
 а) – подгонка кривизны первой кривой I типа; б) – подгонка кривизны второй кривой I типа

Кручение стало еще меньше напоминать синусоиду визуально, подгонка бессмысленна – данная модель не соответствует чистой синусоиде. При подгонке линейной функции вида $y = kx + b$ и добавлении линии тренда в Excel были получены следующие результаты: $k = -0,0009$ и $k = -0,0013$ (для первой и второй соответственно) – угловой коэффициент, показывает скорость смещения на отрезке; $b = -0,0038$ и $b = 0,0025$ – свободный член, что соответствует выводу о том, что колебания графика смещаются вниз. Желтая линия на графике указывает среднее значение кривизны на отрезке, равное $-0,03373$ и $-0,03372$ для первой и второй соответственно. При увеличении отрезка исследования данная линия будет смещаться вниз (рис. 8).

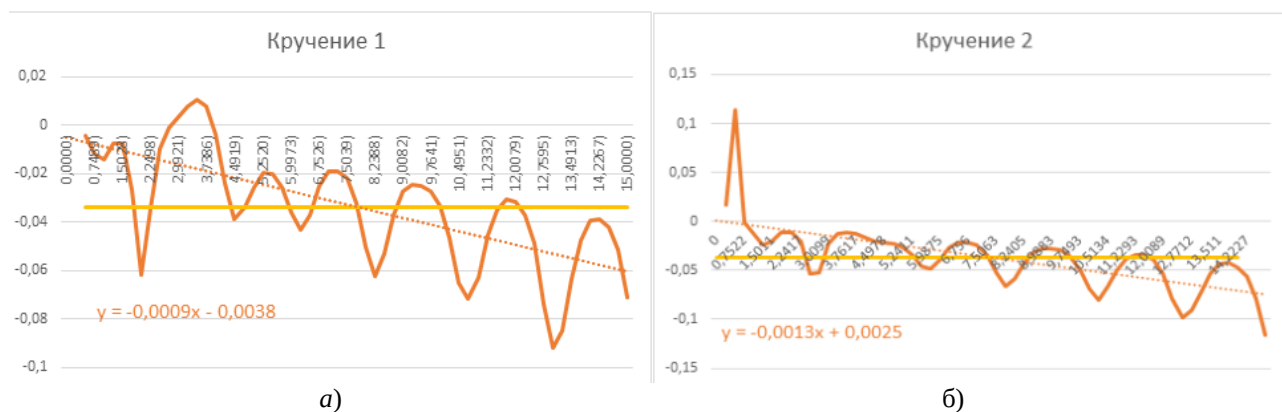


Рис. 8. Подгонка линейной функции к графикам кручения кривых I типа:
а) – подгонка кручения первой кривой I типа; б) – подгонка кручения второй кривой I типа

Разложение в спектр Фурье подтверждает усложнение сигнала по сравнению с параметрической спиралью (рис. 9). При визуальном анализе графика кручения наблюдается смещение графика вниз.

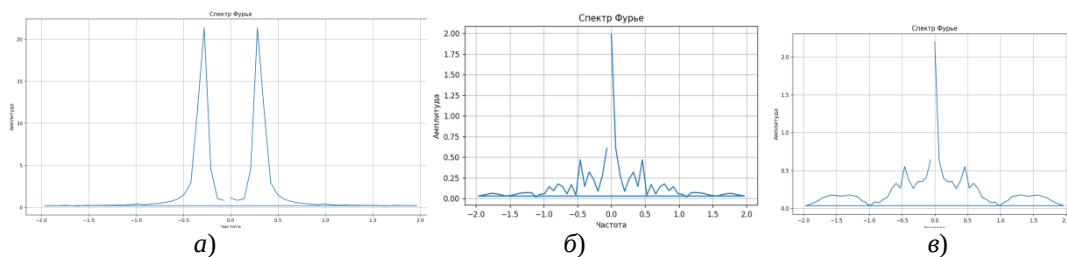


Рис. 9. Разложение в спектр гармоник Фурье (FFT-анализ):
а) – разложение графиков кручения параметрической кривой; б) – разложение графика кручения первой кривой I типа; в) – разложение графика кручения второй кривой I типа

Резюмируем: поведение кривизны и кручения схожи у параметрической кривой и обеих кривых I типа. Кривизна во всех взятых случаях экспоненциально убывает, а кручение совершает колебания с незатухающей амплитудой. Следовательно, справедливо предположить, что кривизна и кручение неустойчивых кривых будет вести себя иначе.

Неустойчивые кривые. Кривые II типа

Кривые второго типа находятся правее по оси x относительно области асимптотической устойчивости, вначале закручиваются и стремятся к нулю, а затем резко меняют свое направление уходят от него (рис. 10).

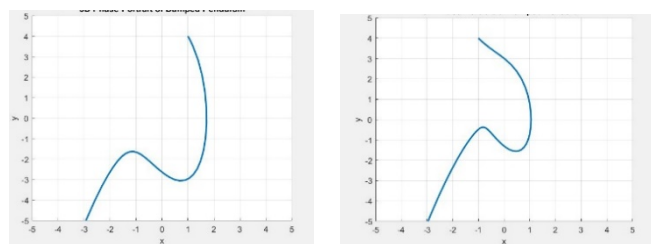


Рис. 10. Примеры кривых II типа

Данные кривые не имеют предела, их нельзя назвать ни расходящимися, ни сходящимися. Шаг квантования при анализе данных кривых составляет 0.25. Справедливо называть их поведение неопределенным.

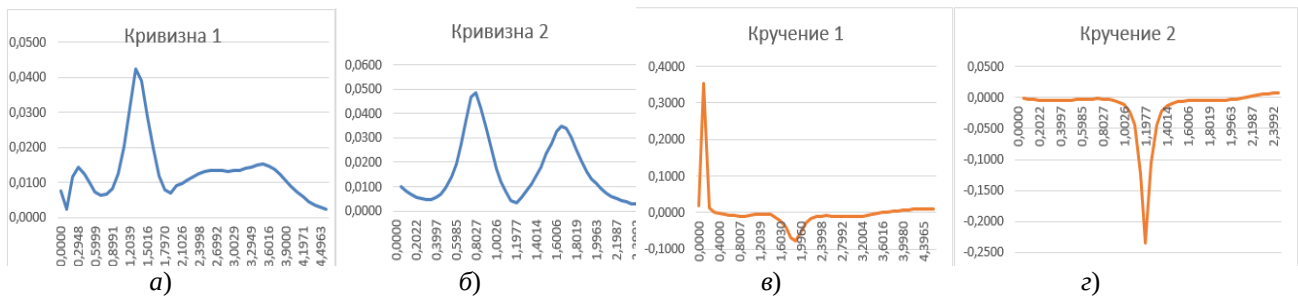


Рис. 11. Графики кривизны и кручения кривых II типа: а) – кривизна первой кривой II типа; б) – кривизна второй кривой II типа; в) – кручение первой кривой II типа; з) – кручение второй кривой II типа

Графики кривизны и кручения не имеют ясных функциональных зависимостей, ведут себя неоднозначно кривых (рис. 11). Имеют резкие «всплески», несколько пиков, что соответствует изменениям направления кривой. Графики кривизны не стремятся к какому-либо значению, а графики кручения не совершают колебаний, что отлично от результатов анализа устойчивых.

Кривые III типа

Находятся левее области асимптотической устойчивости, изогнуты в середине в сторону нуля. Плавно и незначительно меняют направление в пространстве (рис. 12).

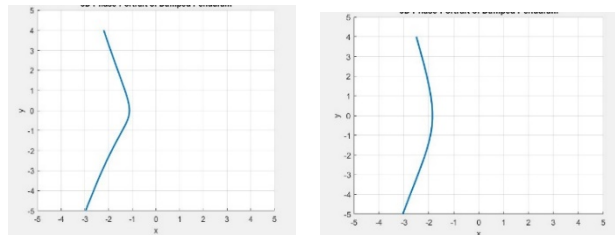


Рис. 12. Примеры кривых III типа

Находятся левее области асимптотической устойчивости, изогнуты в середине в сторону нуля. Плавно и незначительно меняют направление в пространстве (рис. 12). Шаг квантования составляет 0.15.

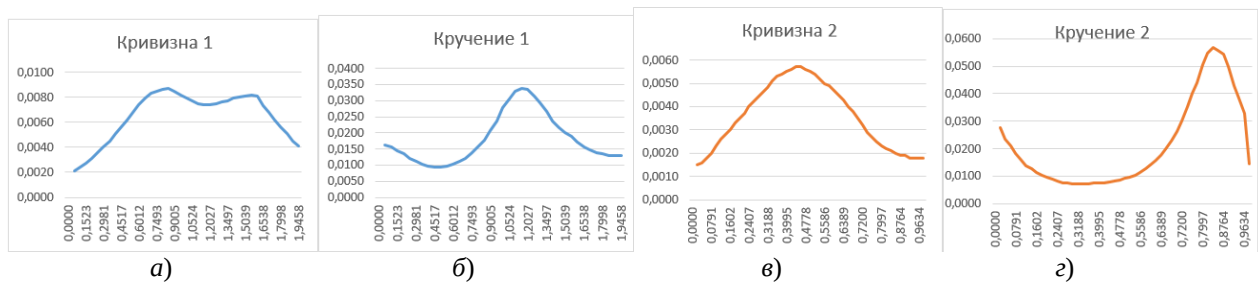


Рис. 13. Графики кривизны и кручения кривых III типа: а) – кривизна первой кривой III типа; б) – кривизна второй кривой III типа; в) – кручение первой кривой III типа; з) – кручение второй кривой III типа

Графики кривизны и кручения не имеют ясных функциональных зависимостей, ведут себя неоднозначно. Оба графика очень плавные: присутствуют колоколообразные пики, резкие «всплески» отсутствуют, что соответствует плавности кривых. Предела не имеют. Все графики имеют схожее поведение: «всплески» в начале и конце и незначительные колебания на протяжении всего отрезка. Соответствует плавности изменения графиков кривизны и кру-

чения – производная почти всегда приближена к нулю. Графики кривизны не стремятся к какому-либо значению, что отлично от результатов анализа устойчивых кривых (рис. 13).

Резюмируем: графики кривизны и кручения данных кривых, как и ожидалось, кардинально отличаются от графиков устойчивых кривых. Можно утверждать, что поведение, наблюдаемое у кривых I порядка и параметрической кривой, заданной системой (8), нехарактерно для хаотичных неустойчивых кривых. Но имеющихся результатов недостаточно для окончательного вывода о поведении кривизны и кручения неустойчивых кривых, так как проанализированные нами неустойчивые кривые ведут себя слишком хаотично.

По этой причине стоит провести исследование неустойчивой кривой, имеющей какую-либо функциональную зависимость. Возьмем кривую, заданную системой:

$$\begin{cases} x = t \cos(t), \\ y = t \sin(t), \\ z = t. \end{cases} \quad (9)$$

Квантование спирали по оси z производилось с шагом 1. Кривая имеет вид спирали, каждая точка которой удаляется от нуля при увеличении значения t (рис. 14).

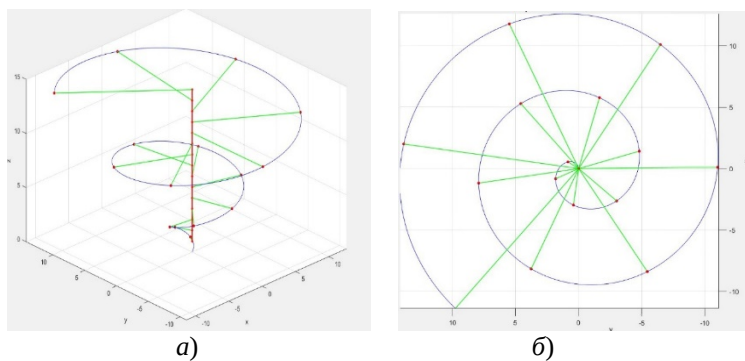


Рис. 14. Кривая, заданная уравнением (9) - параметрическая неустойчивая: а) – перспектива; б) – проекция на плоскость XY

Обе кривые (и кривизны, и кручения) демонстрируют убывающий характер, значения уменьшаются по мере увеличения значения t экспоненциально. Коэффициенты $R^2 = 0,9154$ и $R^2 = 0,9224$ для графика кривизны и кручения соответственно указывает на то, что экспоненциальная модель хорошо описывает данные. Поведение графика кривизны схоже с параметрической устойчивой кривой и кривыми I типа; поведение графика кручения кардинально отличается от графика кручения от устойчивых кривых: наблюдается не беспорядочное поведение, как у кривых II и III типа, а четкая закономерность – график стремится к нулю, колебаний не совершает, что отлично от устойчивых кривых (рис. 15).

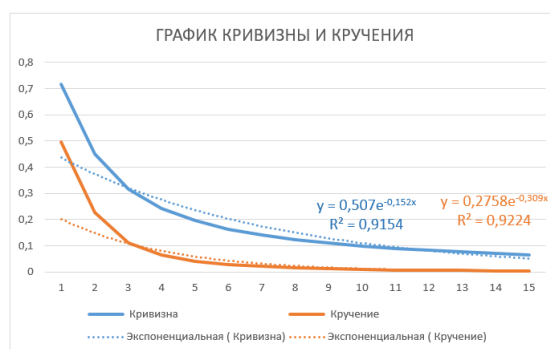


Рис. 15. Графики кривизны и кручения кривой, заданной системой (9)

Тем не менее, результаты не совпадают с результатами устойчивых кривых. То есть даже у функционально заданных в пространстве неустойчивых кривых кривизна убывает, а кручение не колеблется.

Стоит рассмотреть еще один вариант – цилиндрическую винтовую линию, заданную системой:

$$\begin{cases} x = t \cos(t), \\ y = t \sin(t), \\ z = t. \end{cases} \quad (10)$$

Данная кривая не меняет ориентацию в пространстве, поэтому ее кривизна и кручение не будут изменяться. Данная кривая – частный случай, она отлична от обеих рассмотренных групп кривых (рис. 16).

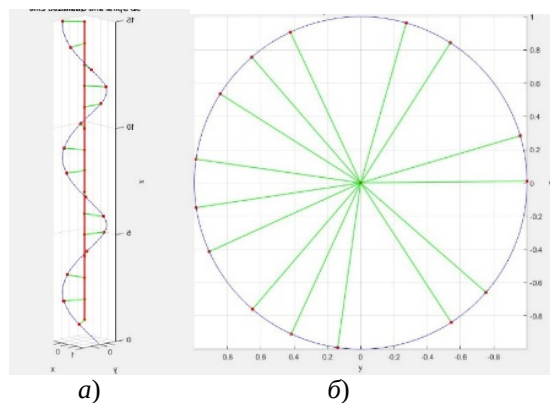


Рис. 16. Кривая, заданная уравнением (10): а) – перспектива; б) – проекция на плоскость XU

Выводы

Проанализировав кривизну и кручение асимптотически устойчивых и неустойчивых кривых в пространстве, были найдены следующие закономерности:

- 1) У всех функционально заданных кривых кривизна экспоненциально уменьшается;
- 2) Кручение устойчивых кривых совершает незатухающие колебания;
- 3) Кривизна и кручение не имеющих зависимости также не имеет зависимости;
- 4) Кривизна и кручение для устойчивых и неустойчивых кривых различна;
- 5) Результаты анализа в каждой группе кривых имеют закономерность и схожи с результатами в своей группе.

Резюмируя вышесказанное, можно утверждать, что результаты анализа подтверждают выдвинутую гипотезу. На основе гипотезы и результатов анализа справедлива следующая лемма:

Лемма. Зная кривизну и кручение кривой, можно судить о ее асимптотической устойчивости по Ляпунову.

Теорема. Если кручение кривой совершает незатухающие колебания, то кривая асимптотически устойчива по Ляпунову.

Следует заметить, что смещение колебаний кручения относительно оси x не влияет на ее устойчивость.

Теорема и лемма выдвинуты на основании вычислительного эксперимента и требуют теоретического доказательства.

Библиографический список

1. Барбашин Е. А. Функции Ляпунова. — М.: Наука, 1970. — 240 с.

2. Финогенко И. А. Принцип инвариантности для неавтономных дифференциальных уравнений с разрывными правыми частями // Сибирский математический журнал. — 2016. — Т. 57, № 4. С. 914-927.
3. Миронов В. В., Митрохин Ю. С. Технологический подход к исследованию устойчивости динамических систем: прикладные вопросы // Вестник РГРТУ. — 2017. — № 1 (59). — С. 127-136.
4. Шафаревич А. И. Классическая дифференциальная геометрия. — М.: МЕХМАТ МГУ, 2010. — 123 с.

УДК 510.21; ГРНТИ 02.31.31

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ИНТЕЛЛЕКТА, АКСИОМАТИЗАЦИЯ, АЛГЕБРА И ПАРАДОКС ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА, ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИНТЕЛЛЕКТА

Вал. В. Миронов

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, mironov1vv@mail.ru*

Аннотация. Искусственный интеллект (ИИ) — это одна из наиболее важных технологий современности, которая активно внедряется во все сферы человеческой деятельности. Но существует ли пределы познания человеческого интеллекта (ЧИ) или искусственного интеллекта?

В первой (математической) части статьи обсуждается общая проблематика пределов интеллекта. Приводятся математические модели ИИ и ЧИ. Проводится классификация ИИ. Строится принципиальная, неустранимая граница (парадокс) ИИ и указывается путь ограниченный ИИ для преодоления парадокса. На множестве ИИ вводятся алгебраические операции и строится алгебра ИИ. Направление ИИ формализуется путем введения аксиом ИИ. Предложены к рассмотрению границы ЧИ в их логической связи с границами ИИ.

Во второй (философской) части статьи рассматриваются принципиальные вопросы развития всей темы «Искусственный интеллект» и перспективы взаимоотношений ИИ и ЧИ. Обосновывается тезис неизбежного окончания эры человечества и «тихий» Апокалипсис посредством ИИ.

Ключевые слова: искусственный интеллект, границы и парадокс интеллекта, перспективы взаимоотношений человека и машины, Апокалипсис.

MATHEMATICAL MODELS OF INTELLIGENCE, AXIOMATIZATION, ALGEBRA AND PARADOX OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE, PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF INTELLIGENCE

Val. V. Mironov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russian Federation, Ryazan, mironov1vv@mail.ru*

The summary. Artificial intelligence (AI) is one of the most important technologies of our time, which is actively being introduced into all spheres of human activity. But are there limits to the knowledge of human intelligence (HI) or artificial intelligence?

The first (mathematical) part of the article discusses the general problems of the limits of intelligence. Mathematical models of AI and HI are given. Classification of AI is carried out. A fundamental, irremovable boundary (paradox) of AI is constructed and the path of AI limitations to overcome the paradox is indicated. Algebraic operations are introduced on the set of AI and an AI algebra is constructed. The direction of AI is formalized by introducing the axioms of AI. The boundaries of HI in their logical connection with the boundaries of AI are proposed for consideration.

The second (philosophical) part of the article considers the fundamental issues of the development of the entire topic of "Artificial Intelligence" and the prospects for the relationship between AI and HI. The thesis of the inevitable end of the era of humanity and the "quiet" Apocalypse through AI is substantiated.

Key words: artificial intelligence, boundaries and paradox of intelligence, prospects for the relationship between man and machine, Apocalypse.

ЧАСТЬ 1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

«Граница между очевидным и недоступным очень тонкая»

акад. А. Н. Колмогоров

«... И имя этой границы – НЕПРЕОДОЛИМЫЕ пределы интеллекта»

Вал. В. Миронов

Введение

Каковы принципиальные, непреодолимые пределы интеллекта, как искусственного, так и человеческого? И, вообще, существуют ли они? И вслед этому: каковы принципиальные, неустранимые различия интеллекта искусственного и человеческого? Что ждет ИИ и нас вместе с ним?

Вынесенный во введении фундаментальные вопросы, давно известные (в философском плане, см., к примеру, [1 - 2] или в формально-логическом плане? см., к примеру, [3 - 4]), при этом перевод статьи [3] приведен в препринте автора [4]) и до сих пор в окончательном виде неразрешимые (ни в философском, ни в формально логическом планах), вопросы эти чрезвычайно трудны. Так выдающийся математик современности С. Смейл относит эти вопросы к основным математическим задачам текущего столетия [3] и, думается, выйдут за пределы XXI века [4].

При попытке ответить на эти вопросы без хорошо известного материала (и даже банальностей) не обойтись. Приведем некоторые данные. Синтезируя материал из работ [5 - 9], скажем, что

человеческий интеллект (латинское *intellectus*; в русской транскрипции ЧИ или ЧЕЛ) – восприятие или разумение, или рассудок, или ум – это качество человеческого мозга воспринимать реальные явления и ситуации и на этой основе строить новые, виртуальные ситуации в их взаимоотношении, это способность к пониманию (пролонгации) причин и следствий явлений, способность к обучению, повторению, запоминанию и использованию накопленных знаний для управления окружающей средой и виртуальными объектами, способность мозга объединять ощущения, восприятие, память, представление, мышление, воображение и классифицировать их и на этой основе получать новые знания.

Синтезируя материал из работ [10 - 15], скажем, что

искусственный интеллект (от англ. *artificial intelligence*; в русской транскрипции ИИ) – это тот же интеллект (см. приведенные выше определения), но демонстрируемый машинами, в частности, компьютерными системами: это качество машины воспринимать реальные явления и ситуации и на этой основе строить новые, виртуальные ситуации в их взаимоотношении, это способность к пролонгации причин и следствий явлений, способность к обучению, повторению, запоминанию и использованию накопленных знаний для управления окружающей средой и виртуальными объектами, способность машины объединять видение, восприятие, память, представление и классифицировать их и на этой основе получать новое знание.

Одновременно искусственный интеллект это область компьютерных наук, в которой разрабатываются и изучаются математические методы и программное обеспечение, позволяющие машинам (или роботам) воспринимать окружающую действительность и использовать ее для достижения поставленных целей. Примерами таких машин могут быть поисковые системы (Google, Search, Bing, Яндекс); или рекомендательные системы (используемые на YouTube, Amazon и Netflix); или взаимодействие посредством человеческой речи (Google Assistant, Siri, Alexa, Алиса); или автономные транспортные средства (Waymo); или генеративные и творческие машины (ChatGPT).

Трудность проблемы границ интеллекта во многом (если не во всем!) состоит в том, что (как следует из приводимых определений и ссылок) размыты сами понятия «интеллект» и, как следствие, «предел интеллекта». Как понимать предел «размытого»? Скорее всего, это

некая граница сложности или граница темы, которую человек (ЧЕЛ) или искусственный интеллект (ИИ) перейти в полной мере не сможет, в том смысле, что некоторые задачи ни ЧЕЛ, ни ИИ в принципе не сможет решить. Вопрос именно в границе доступного для разума ЧЕЛ или ИИ. Образно говоря, от этой границы на «шаг» влево – задача решается, на шаг «вправо» задача не решается в принципе.

На первый взгляд построить такие пределы интеллекта нетрудно, они лежат «на поверхности», они бесспорны.

ПРЕДЕЛЫ ИНТЕЛЛЕКТА.

1. Ни ЧЕЛ (мы будем употреблять также сокращение ЧИ = ЧЕЛ), ни ИИ не могут оперировать с бесконечными множествами, поддерживая контроль над каждым элементом. Для таких операций необходимо иметь не только бесконечно большую память, но и работать с бесконечно большими скоростями. Это под силу только Богу (автор говорит об этом и здесь, и далее без тени иронии!). По этому поводу см. работу [16].

2. Ни ЧЕЛ, ни ИИ не могут решить алгоритмически неразрешимые задачи. К примеру, на вопрос Д. Гильберта: (так называемая 10-я проблема Гильберта, [17]), как доказал (ныне академик) М. Ю. Матиясевич [18] ответить в принципе нельзя.

К этому же типу задач можно отнести те задачи, в которых не удастся избежать закливания алгоритма, как, например, при решении задач линейного программирования симплекс-методом (СМ). В отдельных задачах с закливанием справляются, но создать такую модификацию СМ, которая «брала бы» любые закливания до сих пор не удается.

Кстати, создать алгоритм, решающий любые задачи ЛП за полиномиальное время (одно из важнейших условий для ИИ) также до сих пор не удалось, хотя некоторые продвижения для подкласса задач ЛП удалось построить [19] и перспективы развития этого метода не исчерпаны.

Заметим в этой связи, что один из наиболее видных математиков современности М. Атья считал, что подавляющее число «трудных задач», не поддающихся решению на длительном промежутке времени, будут алгоритмически неразрешимы [20].

3. По мере продвижения «вглубь материи» возникают неопределенности «типа неравенства Гайзенберга», преодолеть которые нельзя в принципе [21].

4. То там, то там, в науке и технике возникают «самоподобные», так называемые фрактальные структуры, части которых абсолютно повторяют целое и не несут другой информации, и потому дробление целого на части не ведет к познанию целого [22].

5. ИИ, овладевая деталями вложенной в него информации, не может создать ничего принципиально нового, которое приходит к человеку зачастую интуитивно [23]. В этом же контексте можно рассматривать решения задач, основанных на понимании красоты и гармонии возникающих идей. Для ИИ такие методы недоступны.

6. Инструментарий ИИ и ЧЕЛ в инженерии знаний ограничен и восполнить его может только другой ИИ или другой ЧЕЛ [24, 25].

Существуют и другие примеры «недоступных» задач, связанные с ограниченностью скоростей, объемов памяти и разрешимостью задач для ИИ и ЧИ.

Но если отойти от «поверхностных», бесспорных примеров, задача определения границ и возможностей ИИ и ЧИ становится чрезвычайно сложной.

Конкретизируем некоторые подходы к решению сверхзадач, ограниченности ИИ и ЧИ в их решении. В работе [26] Пенроуз пытается представить некоторые ограничения для искусственного интеллекта. В его аргументах о границах ИИ фигурирует идея о неразрешимости в виде вопроса: «является ли множество Мандельброта разрешимым?» [27], а также выводы из теоремы Гёделя о неполноте [28].

Эти рассуждения можно отнести к «внешним» проблемам аргументации. Большую сложность представляет необходимость всесторонних исследований (теория + эксперимент +

анализ статистики экспериментов), которые вовлекали бы модели мозга и компьютера, с целью найти то общее и отличное, что имеют искусственный и человеческий интеллект.

Для такого проекта требуется разработать математическую модель интеллекта с ее разновидностями, принимающими во внимание различия между видами интеллекта.

Важно понять, что в этом проекте может и не быть единственной модели. Даже в физике, которая более ясно определена, нежели тема взаимодействия ИИ и ЧИ, имеется классическая механика и теория относительности, каждая из которых привносит свое понимание и имеет свои ограничения. В свою очередь, сами модели являются порой значительно упрощенными идеализациями реальности, которые передают лишь основные положения, игнорируя «тонкости». Так, на примере физики именно тонкости не дают создать единую теорию «всей» физики.

Важной частью интеллектуальной деятельности ИИ является проблема разрешимости. В этой части имеется традиционная модель – машина Тьюринга, а также новая машина, которая обрабатывает действительные числа (см. работу [29]) и о которой упоминается также в работе [3]. Машина Тьюринга была принята как разумная модель для цифрового компьютера [30].

Известны доводы в пользу альтернативной машины действительных чисел, как более подходящей модели для использования цифрового компьютера в научных целях и в ситуациях, где преобладают арифметические действия. Такие математические модели для человеческого интеллекта разработаны в меньшей степени. Существует один пример общей проблемы, которая находится на переднем плане; это – проблема разрешимости уравнений для полиномиальных систем над некоторым полем чисел. Важным особым случаем этой проблемы являются действительные числа с неравенствами. Искусственный интеллект столкнулся с этим в изучении робототехники. Кроме того, в теории *NP*-полноты разрешимость уравнения над любым полем обладает универсальностью в формальном математическом смысле.

Можно задаться вопросом: существует ли форма интеллекта, которая может решить общую систему полиномиальных уравнений?

«Противопоставление» машины Тьюринга и ее действительной копии – это проявление старого «конфликта» между дискретными и непрерывными объектами в физике, перетекшего в математику. Скорее всего, машина действительных ближе из этих двух, для понимания и возможного частичного преодоления ограниченности ЧИ при решении ряда проблем. Заметим, что физические законы лежат в основе и некоторых биологических процессов, а такая «дискретная деятельность», как срабатывание человеческих нейронов описывается соответствующими дифференциальными уравнениями в частных производных. Отсюда следует важный вывод, что дифференциальные уравнения и свойство «равновесия» едины суть в физическом и биологическом мирах. В другом случае дискретные квантовые уровни наиболее понятны, когда описываются в терминах собственных чисел уравнения Шрёдингера [31]

Использование теоремы о неполноте аксиоматик в дискуссии о пределах любого вида интеллекта, ИИ или ЧИ, не вызывает оптимизма. Действительно, идея Гёделя базируется на фиксированной аксиоматике, содержащей аксиомы арифметики. Но тот или иной ИИ, или тот или иной ЧЕЛ способен работать в разных аксиоматиках, переходить от одной к другой и даже выходить за их пределы аксиоматик, руководствуясь для ЧЕЛ интуицией, красотой или гармонией, а для ИИ прецедентом. При этом прецедент может не «осознаваться» машиной, ИИ порой не может объяснить, по каким причинам он выбрал тот или иной вариант и как, вообще, ИИ решал задачу (некая «псевдо интуиция»).

Сами рассматриваемые машинные вычисления над действительными числами или алгоритмы, работающие по точной арифметике, предлагают ограниченное понимание проблемы. Дело в том, что порою требуются модели, которые обрабатывают приближенные вход-

ные данные и которые разрешают округление вычислений без ущерба для ожиданий результата. По этой проблеме в отношении машин действительных чисел можно посмотреть работу [32]. Кроме того, в нашем поиске моделей интеллекта важным компонентом, по-видимому, будет случайность во входных данных и в самой их обработке. При этом «случайность» эта будет иметь двоякую природу: «принципиальная случайность», как в модели Гайзенберга, и «детерминированная случайность», когда процессы детерминированы, но компонент и параметров так много, и они столь плохо измеряемы, что обрабатывать их можно только вероятностными методами или методами нечёткой математики.

Пытаясь понять пределы интеллекта, необходимо учесть и сложность вычислений (о чем говорит уже приведенный пример 1 в обосновании ограничений интеллектов). Любая модель ИИ, не говоря уже о ЧЕЛ, должна столкнуться с этим вопросом, а в наиболее решительной идеализации это сводится к требованию полиномиального времени. Скорее всего, эта проблема решается отрицательно, и NP -задачи существуют и для них $P \neq NP$ (см., к примеру, описание проблемы в работах [3 - 4]).

В научной печати (как правило, весьма невысокого уровня) регулярно появляются сообщения о решении проблемы $P \neq NP$, что является следствием обманчивой ее «простоты», подобно Великой теореме Ферма. Отметим в этой связи, что Математический институт имени Клея (Калифорния, США) включил эту задачу в одну из семи «Проблем тысячелетия» и предложил премию в 1 млн. долл., что является главным драйвером таких публикаций [4]. Автор интуитивно считает, что как только задача $P \neq NP$ будет решена впервые, но окончательно, сразу выяснится, что число NP -задач существенно больше числа P -задач.

Фундаментальный вопрос: Как решать алгоритмически неразрешимые задачи? На этот счет есть интересная идея, которая здесь не обсуждается, но ее можно найти в монографии [4].

Наконец проблема разрешимости, продемонстрированная Тьюрингом и машинами действительных чисел, является только частью размышлений о границах интеллекта. Частью хорошей модели должно быть непрерывное взаимодействие с окружающей средой. Приобретение знаний – часть человеческой интеллектуальной деятельности. Соответствующая математика предлагается теорией повторных игр, нейронных сетей и генетических алгоритмов.

Таким образом, обоснованно возникают вопросы: *как внедрить все это многообразие компонент, составляющих ИИ, изменяющихся во времени и меняющихся от ИИ к ИИ, в модель ИИ или в аксиомы? Существует ли принципиальная граница интеллекта для любого ИИ и искусственного и человеческого? Как определить операции на ИИ, и можно ли построить алгебру ИИ?*

На эти и другие фундаментальные вопросы автор ищет ответы в данной статье. Ответы эти базируются на работах, вынесенных автором в библиографию [1 – 40], и одновременно являются пионерскими в рассматриваемой области. По этой причине автор использует в ряде случаев неустоявшуюся терминологию при соответствующих пояснениях.

§ 1. Определения, обозначения и некоторые аксиомы и модель искусственного интеллекта

П. 1. Что такое интеллект, как математический объект? Каковы аксиомы искусственного и человеческого интеллекта?

ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ искусственный интеллект (ИИ) с математической точки зрения есть совокупность искусственного мозга (I) и рабочих элементов - аппаратно-программных комплексов (АПК).

ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ мозг I - это комплекс компьютерных программ, который «осмысливает» данные, хранящиеся в аппаратно-программных комплексах (АПК), формирует их виртуальное взаимодействие, выбирает наилучшее решение задачи по заданным критери-

ям оптимальности. Мозг I обучает (изменяет) составные части (элементы) АПК и обучается (изменяется) сам по заданным программам и критериям обучения.

ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ аппаратно-программные комплексы – это с одной стороны «железо», т.е. конкретные материальные носители, а с другой стороны - интеллектуальные наполнители «железа», т.е. методы, алгоритмы, критерии и прочие математические атрибуты, не вошедшие непосредственно в мозг I , на основе которых мозг I создает виртуальные картины (виртуальный мир). Такие АПК, участвующие в формировании ИИ, будем записывать малыми латинскими буквами, возможно, с индексами: $a, b, \dots; a_1, b^2, \dots$

Все элементы ИИ и мозг, и элементы АПК могут изменяться во времени, зависеть от тех или иных входных параметров и реализовывать, и представлять в процессе работы те или иные выходные данные, затребованные пользователем.

Искусственный интеллект будем обозначать большими латинскими буквами A, B, \dots , возможно, с нижними или верхними индексами A_1, B^2, \dots , а его компоненты – мозг и АПК записывать в «рубленных» скобках, к примеру, искусственный интеллект

$$A = \langle I; a, b, c, \dots \rangle. \quad (1)$$

Мозг может состоять из составных частей. Это факт при необходимости будем записывать в виде $I = [I_1, I_2, \dots]$.

Аппаратно программные комплексы, в свою очередь, могут состоять из составных частей. Это факт при необходимости будем записывать, к примеру, в виде $a = [a_1, a_2, \dots]$.

Мозг ИИ, состоит он из одной или нескольких компонент, будем называть также носителем ИИ.

Все АПК однокомпонентные или многокомпонентные, вошедшие в ИИ (1), будем называть также сигнатурой ИИ и писать $S = [a, b, c, \dots]$.

Наравне с записью (1) для ИИ будем использовать запись

$$A = \langle I; S \rangle, \quad (2.a)$$

если носитель и сигнатура ИИ заранее описаны.

ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ любой ИИ и любые его составляющие части (мозг, АПК) содержат только конечное число компонент.

Все носители и все АПК или уже хранятся, или могут храниться, разрозненно в некоем хранилище данных $@ = \{I_1, I_2, a, b, c, \dots; a_1, b^2, \dots\}$.

П.2 Аксиома выбора позволяет выбрать из хранилища $@$ любой носитель и любые АПК по одному: a, b, c, \dots

Аксиома выбора позволяет также разобрать ИИ $A = [I; a, b, c, \dots]$ на составляющие элементы I, a, b, c .

Аксиома сбора позволяет соединить выбранные из хранилища мозг I и выбранные АПК в один искусственный интеллект, этот факт создания ИИ, по-прежнему, будем записывать в виде $A = [I; a, b, c, \dots]$.

Аксиома сбора позволяет отправить составляющие I, a, b, c снова в хранилище $@$.

Аксиомы сбора и выбора позволяют из нескольких ИИ A_1, A_2, \dots, A_n собрать один ИИ B_0 , такой, что

$$(\forall n) A_n \subset B_0. \quad (2.b)$$

§ 2. Определения, обозначения, аксиомы и модель человеческого интеллекта

П. 1. По аналогии с описанием искусственного интеллекта с математической точки зрения опишем и человеческий интеллект (ЧИ или ЧЕЛ) с математической точки зрения. А именно, ЧЕЛ есть совокупность природного мозга (I) и рабочих элементов – клеток или нейронов мозга (НМ), которые мы также (без ущерба для истины) назовем аппаратно-программными комплексами ЧЕЛ.

ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ мозг I - это система нейронов или по соглашению АПК, которая осмысливает данные, в них хранящиеся, формирует их виртуальное взаимодействие, выбирает наилучшее решение задачи по заданным критериям оптимальности. Мозг I обучает (изменяет) составные части (элементы) АПК и обучается (изменяется) сам по заданным программам и критериям обучения.

Такие АПК – это с одной стороны биологические клетки, если угодно, «железо», т.е. конкретные материальные носители, а с другой стороны - интеллектуальные наполнители «железа», т.е. методы, алгоритмы, критерии и прочие атрибуты, на основе которых мозг I создает виртуальные картины (виртуальный мир), оценивая его адекватность реальности.

Такие комплексы нейронов, участвующие в формировании ЧИ, снова будем записывать малыми латинскими буквами, возможно, с индексами: $a, b, \dots; a_1, b^2, \dots$

Все элементы ЧИ и мозг, и элементы АПК могут изменяться во времени, зависеть от тех или иных входных параметров и реализовывать в процессе работы те или иные выходные данные.

Человеческий интеллект также будем обозначать большими латинскими буквами A, B, \dots , возможно, с нижними или верхними индексами A_1, B^2, \dots , а его компоненты – мозг и АПК записывать в наклонных скобках, к примеру, искусственный интеллект

$$A = \langle I; a, b, c, \dots \rangle. \quad (3)$$

Модель мозга может состоять из составных частей. Это факт при необходимости будем записывать в виде $I = [I_1, I_2, \dots]$.

Аппаратно программные комплексы ЧИ, в свою очередь, могут состоять из составных частей. Это факт при необходимости будем записывать, к примеру, в виде $a = [a_1, a_2, \dots]$.

Мозг ЧИ, состоит он из одной или нескольких компонент, будем называть также носителем ИИ.

Все АПК, однокомпонентные или многокомпонентные, вошедшие в ИИ (1), будем называть также сигнатурой ЧИ и писать $S = [a, b, c, \dots]$

Наравне с записью (3) для ЧИ будем использовать запись $A = \langle I; S \rangle$, если носитель и сигнатура описаны.

ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ любой ЧИ и любые его составляющие (мозг, АПК) содержат только конечное число компонент.

ЗАМЕЧАНИЕ. Один и тот же ИИ или ЧИ может быть описан через носитель и сигнатуру разными способами, все зависит от целей и намерений ИИ или ЧИ, составляющего такие данные. И такое описание может колебаться в довольно широких пределах от единиц до многих тысяч и более. *Конец замечания.*

П. 2. Все носители и все АПК мозга или уже хранятся, или могут храниться, разрозненно в некотором отсеке его памяти – хранилище данных $@ = \{I_1, I_2, a, b, c, \dots; a_1, b^2, \dots\}$, что условно запишем в виде $@ \subset I$

Аксиома выбора позволяет человеку выбрать из хранилища @ (активировать в памяти) любой носитель и любые АПК по одному: a, b, c, \dots

Аксиома выбора позволяет также человеку разобрать ЧИ $A = [I; a, b, c, \dots]$ на составляющие элементы I, a, b, c и держать их в памяти разрозненно или даже забыть их.

Аксиома сбора позволяет человеку вспомнить и соединить выбранные из хранилища мозг I и выбранные АПК в один человеческий интеллект, этот факт создания ЧИ по-прежнему будем записывать в виде $A = [I; a, b, c, \dots]$.

Аксиома сбора позволяет отправить составляющие I, a, b, c снова в хранилище @.

ЗАМЕЧАНИЕ. В отличие от ИИ, из нескольких ЧИ нельзя собрать один, более мощный ЧИ, используя хранилище АПК.

С другой стороны, что мешает нам из нескольких ЧИ создать коллектив ЧИ и также назвать его ЧИ, точнее, для распознавания КЧИ (коллективный ЧИ). *Конец замечания.*

Аксиомы сбора и выбора позволяют из нескольких ИИ A_1, A_2, \dots, A_n собрать один ИИ B_0 , такой, что

$$(\forall n)A_n \subset B_0. \quad (2.b)$$

Таким образом, с точки зрения математического моделирования можно сделать парадоксальный вывод:

УТВЕРЖДЕНИЕ 1. Математические модели искусственного интеллекта и человеческого интеллекта внешне (по своей структуре) идентичны.

Фундаментальные вопросы. Математические модели искусственного интеллекта и человеческого интеллект, как таковые (т.е. в целом, без привязки к конкретным носителям) будут

- 1) внутренне (т.е. по своим свойствам) в точности идентичны?
- 2) внутренне будут во многом совпадать?

Опыт развития ИИ на современном этапе склоняет автора к ответу

ОТВЕТ на вопрос 1. Нет, ибо

1.1) В сигнатуре ИИ присутствуют АПК, которые не могут быть повторены в сигнатуре ЧИ.

1.2) В сигнатуре ЧИ присутствуют АПК, которые не могут быть повторены в сигнатуре ИИ.

Обоснование 1. В самом деле, в сигнатуре ИИ нет и, скорее всего, в принципе не может быть, АПК отвечающих за интуицию в глубоком ее понимании, свойственном ЧИ, точнее некоторым ЧИ. Что значит «в глубоком»?

Господь говорит: «Дух дышит, где хочет, и голос его слышишь, и не знаешь, откуда приходит и куда уходит: так бывает со всяким, рожденным от Духа»¹. Здесь важно, что «слышишь» и что Дух неподвластен для ЧИ. По поводу глубины интуиции А. Пуанкаре (в нашем деле лучше обращаться к авторитетам) свидетельствует: «Казалось, ниоткуда приходит короткая идея, но в ней все»².

Известно, что ИИ также иногда производит действие и не может объяснить, почему именно так? Речь может идти о некоем «прототипе» интуиции. Но неустранимое отличие в том, что «не может объяснить» и «... в ней все» - две большие, принципиальные «разницы»!

С другой стороны ЧИ не может в принципе, в отличие от ИИ, обрабатывать огромные массивы данных с высочайшими скоростями, далеко просчитывая «ходы рассуждений» по заданным критериям. В отличие от ИИ, ЧИ способен «на ходу» генерировать новые критерии качества, продвигающие его к решению, к таким «немашинным качествам» относятся, например, красота, гармония, наконец, вера, точнее ВЕРА (имея ввиду искренность и неформальность последней и «чистоту» ее носителя).

ОТВЕТ на вопрос 2. Да, ибо,

учитывая, что сигнатуры ИИ и ЧИ во многом, точнее, почти во всем могут (что мы старались аргументировать) «повторять» друг друга, а правило вывода «модус поненс» остается неизменным и для ИИ, и для ЧИ в любых алгебрах логики (см. работы [33 - 37]) и в детерминированном, и в вероятностном вариантах, то можно выдвинуть обоснованно следующую гипотезу.

ГИПОТЕЗА. По результатам деятельности ИИ, рано или поздно, почти во всех направлениях (кроме перечисленных) «догонит» и «перегонит» ЧИ в том смысле, что любые задачи, решаемые ЧИ, сможет решать ИИ и одновременно ИИ сможет решать некоторые задачи, недоступные ЧИ.

¹ Евангелие от Иоанна, гл. 3: 8.

² Тяпкин А.А., Шибанов А.С./ Серия ЖЗЛ / Пуанкаре, М.: Молодая гвардия, 1982. – 435 с.

Итак, мы привели некоторое обоснование принципиального, фундаментального отличия ИИ от ЧИ. Как видится, других принципиальных отличий то и нет.

§ 3. Классификация ИИ

Предложим формально-логическую классификацию четырех классов ИИ в зависимости от масштаба применения и энергии потребления: 1) предискусственный интеллект (или ПредИИ) выполняет простейшие операции без «рассуждений», 2) индивидуальный (персональный) ИИ, 3) промышленно-корпоративный ИИ, 4) глобальный ИИ.

По определению для названных случаев соответствующий ИИ имеет следующую структуру»:

1) ПредИИ:

$$A = \langle \emptyset; b, c, \dots \rangle. \quad (4)$$

при котором носитель ИИ отсутствует, а ПредИИ «бездумно» совершает простейшие операции (приводит известные ответы на известные вопросы, совершает простые арифметические действия, переводит слова и простые фразы, простейшие вопросно-ответные системы и т.п.); предельно малое потребление энергии.

2) Индивидуальный ИИ:

$$A = \langle I_1; a, b, c, \dots \rangle, \quad (5)$$

при котором носитель ИИ состоит из одной компоненты для совершения простейших операций (ответы на простые вопросы, языковые переводы, сбор данных, декларирование известной информации, вопросно-ответные системы и т.п.); малое потребление энергии.

3) Промышленно-корпоративный ИИ:

$$A = \langle I = [I_1, I_2, \dots, I_{min}]; @_{min} \rangle, \quad (6)$$

при котором и носитель ИИ и сигнатура ИИ имеет минимальное и одновременно достаточно большое наполнение для обдуманного решения промышленных задач (планирование, реализация, продвижение на рынке и т.п.); среднее потребление энергии, которое предприятие может оплатить.

4) Глобальный ИИ:

$$A = \langle I = [I_1, I_2, \dots, I_{max}]; @_{max} \rangle, \quad (7)$$

при котором и носитель ИИ, и сигнатура ИИ имеет максимальное, предельно большое число компонент для крупной страны или группы стран с очень большим энергетическим потенциалом, что позволяет обдуманно решать стратегические задачи (стратегическое планирование, стратегическая реализация, продвижение на глобальном рынке, планирование войны или мирных соглашений и т.п.); глобальное потребление энергии.

ЗАМЕЧАНИЕ. Энергетические ограничения и сама логика развития ИИ, безумная конкуренция в сфере ИИ, скорее всего, заставят создать и производить биологический ИИ по примеру человеческого мозга, который потребляет минимальное количество энергии.

Будущее, вполне возможное, создание супер глобального биологического ИИ - мозга Земли (ИИЗ), уже пугает. В самом деле, как известно, человеческий мозг потребляет 18 – 25 Вт энергии. Ну, пусть по максимуму 25 Вт. По прогнозам будущее население человечества определяется в 10 млрд. чел. (больше Земля уже «не потянет»). Таким образом, если ИИЗ сопоставим с мышлением всего человечества, то он должен потреблять $25 \times 10^{10} = 250$ ГВт энергии. При этом Курская АЭС (4 энергоблока по 1 ГВт³) производит всего 4 ГВт. Всего в России на всех АЭС 36 подобных энергоблоков. Следовательно, стоит задача создать энергоблоки на порядок мощнее, скажем, 10 ГВт.

С другой стороны, мозг человека занимает объем примерно $0,003 \text{ м}^3$. Тогда объем будущего ИИЗ составит примерно же $0,003 \times 10^{10} = 30 \times 10^6 \text{ м}^3$, т.е. 30 зданий (небо-

³ В рабочем состоянии, на май 2025 г. всего 3

скребов в 33 этажа) размером $100 \text{ м} \times 100 \text{ м} \times 100 \text{ м}$, т.е. улица длиной 1,5 км. Это впечатляет! С другой стороны затраты стоят того, ибо этот ИИЗ будет решать ЛЮБЫЕ принципиально разрешимые задачи, которые только сможет придумать человек, за исключением принципиально не решаемых, о которых здесь уже говорилось.

ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ здесь будет важен вывод: если за обозримое время ИИЗ не может решить задачу, то эта задача будет считаться «принципиально не разрешимой» для сферы обитания человека.

§ 4. Парадокс ИИ

ЗАМЕЧАНИЕ, Тема парадокса ИИ и его разрешения, изложенная в §§ 4, 5, ни идейно, ни технически не связана с темами первых трех параграфов статьи, и потому имеет самостоятельное значение, и может излагаться отдельно. *Конец замечания.*

Пусть имеется ИИ

$$A = \langle I; a, b, c, \dots \rangle. \quad (8)$$

Сам факт существования ИИ означает, что ИИ контролирует работу все АПК из сигнатуры и всех составных частей его «мозга».

Что значит контролирует? По определению это означает, что ИИ подает на вход его частей некоторые данные и гарантирует качество (по заранее определенным критериям) выходных данных. Допускается, что ИИ может не контролировать полностью некоторые его составляющие, но контролировать их с некоторой вероятностью.

Этот факт полного контроля ИИ над его соответствующими частями будем записывать в виде

$$a, b, c \in^{p=1} \text{А или } I \in^{p=1} A, \quad (9.a)$$

или более коротко для данного случая

$$a, b, c \in \text{А или } I \in A \quad (9.b)$$

для элементов сигнатуры или элементов носителя соответственно.

Факт частичного контроля ИИ над его соответствующими частями будем записывать в виде

$$a, b, c \in^p \text{А или } I \in^p A \quad (10)$$

для элементов сигнатуры или элементов носителя соответственно.

Факт отсутствия контроля ИИ (ИИ решает задачу, но несет ответственности за результат) над его соответствующими частями будем записывать в виде

$$a, b, c \in^{p=0} \text{А или } I \in^{p=0} A, \quad (11.a)$$

или более коротко для данного случая

$$a, b, c \notin \text{А или } I \notin A \quad (11.b)$$

для элементов сигнатуры или элементов носителя соответственно.

Аксиома контроля. Целое контролирует любую свою часть с той или иной вероятностью.

Часть не может контролировать целое или, что в данном случае равносильно, контролирует ее с нулевой вероятностью.

Далее мы рассматриваем только абсолютный контроль, т. е. контроль с вероятностью $p = 1$. Тот факт, что ИИ контролировал сам себя, запишем в виде

$$A \in A \quad (12)$$

и в этом случае ИИ будем записывать в виде

$$A = \langle A, I; S \rangle, \quad (13)$$

Если ИИ не контролировал сам себя, то запишем этот факт в виде

$$A \notin A. \quad (14)$$

Тот факт, что ИИ A_1 контролируется ИИ A_2 (в силу аксиомы контроля A_1 является частью A_2) запишем в виде

$$A_1 \subset A_2. \quad (15)$$

Аксиома безопасности. Каждый ИИ должен быть контролируем. Неконтролируемые ИИ опасны.

Кто может контролировать ИИ? В некоторых случаях ЧИ. Известен случай, когда под контролем людей два мощных ИИ общались между собой. Потом неожиданно для людей перешли на язык, человеку непонятный. Испугавшись, люди выключили оба ИИ.

В подавляющем числе случаев ИИ может контролировать другой, более мощный ИИ. А кто контролирует его?

Ясно, что цепочка неконтролирующих друг друга ИИ должна оборваться. Следовательно, с необходимостью должен существовать ИИ, контролирующий сам себя. Другими словами для каждой (конечной) цепочки контролирующих друг друга ИИ

$$A_1 \subset A_2 \subset \dots \subset A_n$$

существует ИИ B_0 , такой, что

$$A_n \subset B_0 \text{ и } B_0 \in B_0. \quad (16)$$

При этом в силу аксиомы контроля над ИИ любой интеллект A_i контролируется со стороны B_0 .

ЗАМЕЧАНИЕ. Найденный парадокс ИИ формально может быть распространен и на ЧИ, если воспользоваться формализацией построения коллективного ЧИ (КЧИ), предпринятой выше. Этот теоретический результат (о его практической значимости говорить не приходится) не несет новых идей и здесь не приводится. *Конец замечания.*

Соберем все ИИ, не контролирующие сами себя (а их, понятно, много)

$$A_1, A_2, \dots, A_N$$

в один мега-ИИ (как уже отмечалось, это возможно) и обозначим его Ω :

$$\Omega = [A_1, A_2, \dots, A_N].$$

ОСНОВНАЯ ПРОБЛЕМА (парадокс ИИ). Искусственный интеллект Ω контролирует сам себя или не контролирует?

Решение. Допустим, что ИИ Ω контролирует сам себя:

$$\Omega \in \Omega. \quad (17)$$

Значит, этот ИИ не может принадлежать Ω , в силу определения (построения) Ω (там собраны только неконтролирующие себя ИИ), т.е.

$$\Omega \notin \Omega. \quad (18)$$

Получено противоречие между условиями (17) и (18).

Допустим, что ИИ Ω не контролирует сам себя:

$$\Omega \notin \Omega. \quad (19)$$

Но тогда он должен войти (по построению) во множество Ω , значит,

$$\Omega \in \Omega. \quad (20)$$

Условия (19), (20) противоречат друг другу.

Таким образом, ответить на поставленный вопрос в принципе невозможно, основная проблема ИИ алгоритмически неразрешима. И, значит, вся теория ИИ в принципе, неустраимо противоречива.

§ 5. Разрешение парадокса

Перефразируя известные слова Д. Гильберта по поводу противоречивости теории множеств Г. Кантора, скажем: «Никто не заставит нас выйти из того «Рая», который создает для нас ИИ».

Как уже понятно из предыдущего, риски как для отдельных людей, предприятий и для человечества в целом несут в себе очень большие, неконтролирующие себя ИИ.

Значит, для предотвращения таких рисков нужны ограничения на мощности (как и при рисках от ядерного оружия и других сопоставимых рисках) и возможности ИИ.

$$\Delta = \langle I = [I_1, I_2, \dots, I_{max}]; @_{max} \rangle. \quad (21)$$

Пусть построен ИИ (корпоративный ли, глобальный ли, индивидуальный ли)

$$\Delta = \langle I = [I_1, I_2, \dots, I_{max}]; @_{max} \rangle, \quad (22)$$

причем, построен обдуманно со следующими свойствами:

- 1) и носитель ИИ, и сигнатура ИИ имеют такое число компонент и потребляет такую энергию, что позволяет обдуманно решать поставленные задачи;
- 2) потребление энергии не сверхбольшое;
- 3) человеку и другому ИИ выходить за пределы такого ИИ для решения означенных задач законодательно запрещено;
- 4) ИИ контролирует сам себя;
- 5) ИИ контролируется человеком;
- 6) через сигнатуру ИИ можно строить только более слабые ИИ с теми же свойствами;
- 7) нарушение правил ведет к демонтажу ИИ (про что ИИ не знает);
- 8) нарушение правил человеком ведет к адекватному его наказанию;
- 9) существует система контроля за соблюдением правил;
- 10) существует контроль над хранением носителей и сигнатуры.

Эти правила позволяют убрать риски при создании и эксплуатации ИИ. Действительно, ИИ Δ контролирует сам себя, следовательно, он контролирует любой свой подынтеллект (внутренний контроль). Другие правила обеспечивают внешний контроль за искусственным интеллектом.

Искусственный интеллект вида (21) со свойствами 1-10 назовем универсальным ИИ для конкретных задач или отраслей.

ЗАМЕЧАНИЕ. Обратим внимание на тот факт, что построить противоречие типа «основной проблемы» внутри любого универсального множества – нереализуемая задача, т.к. в самой проблеме мега-ИИ Ω строятся по **всем** ИИ, не контролирующим сами себя A_1, A_2, \dots, A_N . А все такие ИИ, естественно, ни в какой универсальный ИИ не помещаются, и, потому, противоречия не возникает. *Конец замечания.*

§ 6. Алгебра искусственных интеллектов

Пусть задан универсальный для какой-то отрасли применения ИИ (иногда говорят «универсум»), описанный в максимальных по числу опциях сигнатуры и носителя:

$$\Delta = \langle I = [I_1, I_2, \dots, I_{max}]; @_{max} \rangle.$$

Пусть \mathcal{E} - это множество всех его подынтеллектов:

$$\mathcal{E} = [A_1, A_2, \dots, A_N] \ \& (\forall i) A_i = [I_i; S_i] \ \& (\forall i) A_i \subset \Delta.$$

На множестве \mathcal{E} определим операции сложения, умножения, дополнения.

А) Сложение интеллектов: если заданы два ИИ $A_1 = [I_1; S_1]$, $A_2 = [I_2; S_2]$, то операция сложения есть

$$A_1 + A_2 \stackrel{\text{def}}{=} \langle I = [I_1, I_2]; S = S_1 \cup^+ S_2 \rangle \quad (23)$$

где операция объединения \cup^+ аналогична операции объединения теории множеств с единственным отличием: если в S_1 и в S_2 входит один и тот же АПК a , то в сигнатуру S АПК a входит дважды.

В) Умножение интеллектов: если заданы два ИИ $A_1 = [I_1; S_1]$, $A_2 = [I_2; S_2]$, то операция умножения есть

$$A_1 * A_2 \stackrel{\text{def}}{=} \langle I = [I_1 \cap I_2]; S = S_1 \cap^+ S_2 \rangle \quad (24)$$

где операция пересечения носителей («мозгов «ИИ») $I_1 \cap I_2$ означает, что «мозг» I решает те задачи, которые может решить и «мозг» I_1 , и «мозг» I_2 ; нестандартная операция пересечения

сигнатур $S = S_1 \cap^+ S_2$ означает, что в сигнатуру S входят те АПК из S_1 и S_2 , которые обеспечивают работу «мозга» I , возможно, и с повторениями.

С) Дополнение интеллекта до универсального: если $A_1 = [I_1; S_1]$, то операция дополнения есть

$$\overline{A_1} = \langle \overline{I_1} = [I_2, \dots, I_{max}]; \overline{S_1} = @_{max} \setminus S_1 \rangle. \quad (22)$$

Построенная алгебраическая система

$$\mathcal{E} = \langle \mathcal{E}; +, *, \overline{} \rangle \quad (23)$$

и есть алгебра искусственных интеллектов.

Помимо основных операций на множестве ИИ, составляющих функциональный базис алгебры, можно определить и вспомогательные или рабочие операции, выражающиеся через основные, как, к примеру, операция разности интеллектов и симметрической разности.

Д) Разностью $A_1 \setminus A_2$ двух интеллектов $A_1 = [I_1; S_1]$ и $A_2 = [I_2; S_2]$ назовём интеллект $A = \langle I; S \rangle$, где носитель $I = I_1 \setminus I_2$, а сигнатура $S = S_1 \setminus S_2$, при этом косая черта «\» на носителе и на сигнатуре есть теоретико-множественная разность.

Е) Симметрической разностью $A_1 \nabla A_2$ двух интеллектов $A_1 = [I_1; S_1]$ и $A_2 = [I_2; S_2]$ назовём интеллект $A = \langle I; S \rangle$, где носитель $I = I_1 \nabla I_2$, а сигнатура $S = S_1 \nabla S_2$, при этом знак (буква) ∇ на носителе и на сигнатуре есть теоретико-множественная симметрическая разность.

ЗАМЕЧАНИЕ. Далее автор просто анонсирует свойства операций на искусственных интеллектах (опуская их естественные названия по аналогии с теорией множеств), доказательства свойств будут приведены в другой работе. *Конец замечания.*

ТЕОРЕМА (Основные свойства алгебры интеллектов, здесь Δ – универсальный ИИ, \emptyset – пустой ИИ, A и B – произвольные ИИ)

- | | |
|--|--|
| 1. $A \cup B = B \cup A$; | $A \cap B = B \cap A$; |
| 2. $(A \cup B) \cup C = A \cup (B \cup C)$; | $(A \cap B) \cap C = A \cap (B \cap C)$ |
| 3. $A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$; | $A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$ |
| 4. $A \cup \emptyset = A$; | $A \cap \Delta = A$ |
| 5. $A \cup \overline{A} = \Delta$; | $A \cap \overline{A} = \emptyset$. |
| 6. $\overline{\emptyset} = \Delta$; | $\overline{\Delta} = \emptyset$; |
| 7. $A \cup A = A$; | $A \cap A = A$ |
| 8. $A \cup \Delta = \Delta$; | $A \cap \emptyset = \emptyset$; |
| 9. $A \cup (A \cap B) = A$; | $A \cap (A \cup B) = A$; |
| 10. $\overline{A \cup B} = \overline{A} \cap \overline{B}$; | $\overline{A \cap B} = \overline{A} \cup \overline{B}$ |

§ 7. Набор, как обобщение понятия множества

Под набором будем понимать множество, способное содержать одинаковые элементы.

Глубиной набора назовем натуральное число n , если в наборе нет элементов, повторяющихся более n раз, и одновременно в наборе найдется элемент, повторяющийся ровно n раз.

Набор глубины 1 есть классическое множество.

Глубина набора может быть и счетной, если для любого натурального числа n найдется элемент набора, повторяющийся более n раз.

Очевидно, хранилище данных $@ = \{I_1, I_2, a, b, c, \dots; a_1, b^2, \dots\}$ представляет из себя набор данных конечной глубины ибо повторение АПК для разных частей «мозга» ИИ и возможен, и более того необходим.

Как оперировать с наборами? Покажем это на конкретном числовом наборе. Конкретные искусственные интеллекты и операции над ними – проблема длинная и не до конца понятная в силу сложности самих ИИ, хотя идейную сторону проблемы мы обсудили.

Пусть $Z = \langle Z; +, \cdot \rangle$ – кольцо целых чисел. Возьмем счетное число носителей Z этих колец и каждому элементу припишем индекс, говорящий из какого носителя это число $Z_1 = \{ \dots, -2_1, -1_1, 0_1, 1_1, 2_1, \dots \}$, $Z_2 = \{ \dots, -2_2, -1_2, 0_2, 1_2, 2_2, \dots \}$, \dots , $Z_n = \{ \dots, -2_n, -1_n, 0_n, 1_n, 2_n, \dots \}$, \dots

Воспользуемся аксиомой выбора, сломаем все скобки в носителях и соберем все числа в одном наборе

$$Z^* = [\dots, -2_1, -1_1, 0_1, 1_1, 2_1, \dots, \dots, -2_n, -1_n, 0_n, 1_n, 2_n, \dots]$$

счетной глубины. При этом каждому числу в наборе припишем (нижний) индекс того носителя из которого он изъят.

ЗАМЕЧАНИЕ. Если угодно, для понимания процесса, нижние индексы это «различная одежда» одного и того же числа. Эта «одежда» не влияет на внутренние свойства числа. *Конец замечания.*

Определим операции на элементах набора Z^* так, чтобы свойство «быть кольцом» сохранилось.

А) Сложение: $(\forall m_i)(\forall n_j) m_i + n_j = (m + n)_{i+j}$, где знак $+$ (сложение) – это одновременно сложение в кольце Z .

В) Умножение: $(\forall m_i)(\forall n_j) m_i \cdot n_j = (m \cdot n)_{i \cdot j}$, где знак точка \cdot (умножение) – это одновременно умножение в кольце Z .

УТВЕРЖДЕНИЕ. $Z^* = \langle Z^*; +, \cdot \rangle$ – кольцо относительно алгебраических операций в наборе Z^* .

Если изначальных экземпляров чисел конечное число, получим набор конечной глубины, к примеру, n и тогда операции будут выглядеть так:

А) Сложение: $(\forall m_i)(\forall n_j) m_i + n_j = (m + n)_{i+j}$, где сложение в скобках – это сложение в Z , а сложение в индексах – это сложение в кольце вычетов Z_n .

В) Умножение: $(\forall m_i)(\forall n_j) m_i \cdot n_j = (m \cdot n)_{i \cdot j}$, где умножение в скобках – это умножение в Z , а умножение в индексах – это умножение в кольце вычетов Z_n .

ЗАМЕЧАНИЕ. Очевидно, что построенное таким образом кольцо есть не что иное, как декартова степень колец $Z^* = Z^n$ с естественными операциями на компонентах, и оттого, казалось бы, не несет ничего нового.

Но для работы с ИИ при операциях сложения и умножения ИИ, при слиянии хранилищ и последующем формировании ИИ, описанный метод работы с наборами удобнее и потому предпочтителен. Не говоря уже о том, в некоторых случаях при использовании вероятностных АПК для построения ИИ понадобятся или иные АПК в их старой «одежде». *Конец замечания.*

§ 8. Аксиомы искусственного интеллекта

Соберем уже озвученные аксиомы ИИ и вновь предлагаемые аксиомы в одном месте.

1. Аксиома возможностей. Для любого интеллекта существует принципиально разрешимая задача, которую этот интеллект решить не может. Для любой принципиально разрешимой задачи существует интеллект, который может ее решить.

2. Аксиома безопасности. Каждый ИИ должен быть контролируемым. Неконтролируемые ИИ опасны.

3. Аксиома контроля. Целое контролирует любую свою часть.

Часть не может контролировать целое или, что в данном случае равносильно, контролирует ее с нулевой вероятностью.

4. Аксиома выбора позволяет выбрать из хранилища @любой носитель и любые АПК по одному: a, b, c, \dots

Аксиома выбора позволяет также разобрать ИИ $A = \langle I; a, b, c, \dots \rangle$ на составляющие на составляющие элементы I, a, b, c .

5. Аксиома сбора позволяет соединить выбранные из хранилища мозг I и выбранные АПК в один искусственный интеллект, этот факт создания ИИ, по-прежнему, будем записывать в виде $A = \langle I; a, b, c, \dots \rangle$.

Аксиома сбора позволяет отправить составляющие I, a, b, c снова в хранилище @.

6. Аксиома объемности (аксиомы равенства и тождественного равенства). Если интеллекты $A_1 = \langle I_1; S_1 \rangle$ и $A_2 = \langle I_2; S_2 \rangle$ имеют одинаковые носители: $I_1 = I_2$, то интеллекты равны: $A_1 = A_2$.

Если интеллекты $A_1 = \langle I_1; S_1 \rangle$ и $A_2 = \langle I_2; S_2 \rangle$ имеют одинаковые и носители: $I_1 = I_2$, и сигнатуры $S_1 = S_2$, то интеллекты тождественно равны: $A_1 \equiv A_2$.

7. Аксиома пустого интеллекта. Существует пустой интеллект $\emptyset I$, не способный решить ни одну задачу: $\emptyset = \emptyset I = \langle I; S \rangle$, при этом ни носитель I , ни сигнатура S не поддерживают работоспособность друг друга при решении какой бы то ни было задачи.

УТВЕРЖДЕНИЕ. Нетрудно видеть, что пустыми являются интеллекты:

- 1) $\emptyset I_1 = \langle \emptyset; S_1 \rangle$ с пустым носителем («мозгом»);
- 2) $\emptyset I_2 = \langle I_2; \emptyset \rangle$ при пустой сигнатуре (нет АПК);
- 3) $\emptyset I_3 = \langle \emptyset; \emptyset \rangle$ (нет ни того, ни другого).

8. Аксиома парного интеллекта. При любом носителе I , и любой сигнатуре S , поддерживающими работоспособность друг друга при решении какой-то задачи, существует единственный интеллект $A_1 = \langle I_1; S_1 \rangle \subset A = \langle I; S \rangle$ решающий эту задачу и уменьшить ни носитель I_1 , ни сигнатуру S_1 нельзя.

Такой интеллект обозначим $A_1 = \langle I; S \rangle_{min}$

9. Аксиома интеллектуальной суммы. Для каждого семейства интеллектов A существует множество интеллектов B , состоящее из тех и только тех интеллектов, которые принадлежат некоторому множеству интеллектов C , принадлежащему исходному множеству A .

10. Аксиома степени. Для каждого семейства интеллектов A существует семейство интеллектов B , элементами которого улавляются все подинтеллекты семейства интеллектов A и только они.

11. Аксиома бесконечности. Существует семейство интеллектов A , которому принадлежат пустой интеллект и, если X – подинтеллект A , то в A найдется подинтеллект Y , состоящий из всех подинтеллектов X , включая его самого.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ. Говорят, что объект a удовлетворяет высказывательной (или, говорят, пропозициональной) функции $F(x)$, если высказывание $F(a)$ истинно.

Пусть задана высказывательная функция $F(x)$.

12. Аксиома выделения. Для произвольного семейства интеллектов A существует семейство интеллектов B , состоящее из тех и только тех подинтеллектов A , которые удовлетворяют (или на которых работает) высказывательной функции.

13. Аксиома замены. Если для каждого интеллекта X существует единственный интеллект Y , такой, что $F(x, y)$ истинно, то для каждого множества интеллектов A , найдется множество интеллектов B , состоящее из тех и только тех интеллектов Y , для которых $F(x, y)$ истинно.

Тема анализа свойств предложенных аксиом (полнота, независимость и др.) весьма обширна и трудна, здесь она опущена. Это предмет дальнейших исследований.

Заключение к первой части.

В первой (математической) части статьи проведена следующая работа.

- Проведено обсуждение общей проблематика пределов интеллекта.
- Приводятся
- атематические модели искусственного интеллекта и человеческого интеллекта.
- Проводится классификация искусственного интеллекта.
- Строится принципиальная, неустранимая граница (парадокс) искусственного интеллекта и указывается путь ограничений искусственного интеллекта для преодоления парадокса.
- На множестве искусственных интеллектов вводятся алгебраические операции и строится алгебра искусственных интеллектов.
- Научно-техническое направление искусственного интеллекта формализуется путем введения аксиом искусственного интеллекта ИИ.
- Предложены к рассмотрению границы человеческого интеллекта в их логической связи с границами искусственного интеллекта.

ЧАСТЬ 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

*– Я сказал вам о земном, и вы не верите,
Как поверите, если буду говорить вам о небесном?*

Иисус Христос,

Евангелие от Иоанна. 3:12

Введение

Во второй части статьи мы обоснуем тезис «Человечество не только не захочет выйти из того «рая», который создает для него ИИ, но будет вращаться в этот «рай» посредством ИИ все больше и больше, пока (человечество) вовсе не растворится в ИИ. Конец человечества неизбежен, как и его возрождение во Втором пришествии Христа». Иначе, зачем ВСЁ ЭТО?

В прошлом 2024 г. репрезентативная часть ученых в области ИИ в несколько сотен человек, собранных по всему миру агентством RAND Corporation [(RAND - от англ. *research and development* - исследования и разработки) - американская некоммерческая исследовательская организация, предоставляющая данные государственным учреждениям из США, Европы, Среднего Востока и Азии], провела исследование по проблемам ИИ и официально заявила, что ИИ несет реальную угрозу человечеству. И как следствие, минимизация риска исчезновения человечества из-за ИИ должна стать глобальным приоритетом на Земле⁴.

Весьма вероятно, что возможности ИИ будут использованы (если уже не используются) для планирования глобальных столкновений между ведущими конкурирующими державами, например, для планирования ядерной войны или при создании высокоэффективных смертельных патогенов. Но в случае ядерного конфликта, даже при использовании всех существующих ядерных боеголовок, маловероятно, что человечество, как биологический вид, будет полностью уничтожено. А в случае биологического оружия ИИ пришлось бы убедить людей стать соучастниками проекта, что также маловероятно. В целом, угрозы есть, но уничтожение человечества самого себя маловероятно.

С третьей стороны полностью отказаться от совершенствования ИИ уже невозможно. Значит, нужно снижать риски. Это включает в себя создание безопасных алгоритмов ИИ, контроль над ИИ и ограничение их мощностей, о чем уже писал автор в первой части работы.

Так что же нас ждет в контексте будущего ИИ и будущего человечества? На этот фундаментальный вопрос автор ищет ответ далее. Вопрос настолько сложный и всеобъемлющий, что единого, однозначного, бесспорного ответа на него просто не существует.

Тем интереснее. Один из ответов и предлагает автор.

⁴ vk.com/wall-213891755_14106 (дата обращения 01.03 2025)

§ 1. Несколько слов о необычном

Обратимся к Евангелие. Согласно евангельским свидетельствам, сразу после своего крещения Иисус Христос, ведомый Святым Духом, удалился в пустыню, молился в уединении и посте, и Ангелы служили Ему⁵.

Иисус сорок дней «был искушаем от диавола и ничего не ел в эти дни, а по прошествии их напоследок взалкал»⁶. И являлся Ему дьявол, и трижды пытался склонить его на грех. И вот в третий раз:

- Тебе дам власть над всеми сими царствами и славу их⁷.
- Отойди от Меня, сатана⁸.

Отметим, тем не менее, что от самой власти над миром Христос не отказывался, но Царство Его не от мира сего, и Своих подданных Он спасет на Кресте.

И вот еще в эту же тему позднее в разговоре И. Христа с Пилатом:

- Ты мог бы быть царем, - говорит Пилат.
- Царство Мое не из этого мира⁹, - отвечает Иисус Пилату и равно дьяволу.
- А тогда чье здесь, на Земле, царство? – спросим мы.

И, обернувшись на историю человечества, ответим: «Дьявола!»

А кто такой дьявол? В начале времен Бог сотворил Ангелов, установил между ними иерархию. Одним из высших Ангелов был Денница – приближенный к Богу Ангел. Но Денница возгордился и стал подстрекать Ангелов, к бунту против Бога. Архангел Михаил и верные Богу Ангелы вступили в сражение с ним и, с помощью Божией, низвергли с Неба Денницу, тот стал дьяволом и с ним ушли 1/3 ангелов, ставших бесами.

Гордеца понять можно, первый, но не последний. Но вот как понять 1/3 ангелов, что пошли за ним? Чем он их увлек? А чем увлек Ленин огромные народные массы? Идеей! Идеей разрушения старого и создания на его обломках пролетарского «рая» - свобода, равенство, братство. И люди пошли за ним. По подсчетам Д.И. Менделеева, изучавшего тему развития населения, к концу 2000 г. в России должно было проживать 1 млрд. человек. А проживают? Вот цена социальных экспериментов, эгоизма руководителей и увлеченности народных масс.

Думается, и дьявол увлек ангелов идеей. Какой? Думается, «той же» идеей Господа о создании Рая, для реализации которой Господь Вседержитель и создал Иисуса Христа. На меньшее дьявол не согласился бы. Он захотел стать равным Богу в таком же строительстве. Только «рай» свой дьявол, обуреваемый гордыней, будет создавать не на Небе, а здесь, на Земле и, создав, тем сравняться с Господом Вседержителем. Вот корни его гордыни и идея, увлекающая многих и многих ангелов, не убоявшихся стать демонами.

Из чего создать? Из людей, из их пороков. Как? Внеся в мир и души людей неравенство, зависть, эгоизм, желание первенствовать, убийства и войны, убрать совесть и заповеди Бога. Главное - любой ценой жить долго, богато, в здоровье и тем «счастливо».

И «люди более возлюбили тьму, нежели свет, потому что дела их были злы¹⁰» - говорит Христос. Кто будет толкать людей по этому пути к «раю»? Бесы. Какая идея будет гнать людей к этому «раю» и они побегут сами? Идея бессмертия и полного благоденствия на Земле. Известно, что многие диктаторы, добившиеся верховной власти, мечтали о бессмертии и поддерживали работы в этом направлении.

⁵ Евангелие от Марка. 1:13

⁶ Евангелие от Луки. 4:2

⁷ Евангелие от Луки. 4:5-7

⁸ Евангелие от Матфея. 4:10

⁹ Евангелие от Иоанна. 18:36

¹⁰ Евангелие от Иоанна. 3:19

Дьявол решил создать надежную систему из ненадежных элементов. Разве это возможно? Да. Это направление в техническом мире развивается успешно (к примеру, [38, 39]). С помощью какого всеобщего инструмента построить бессмертный «рай» на Земле? С помощью искусственного интеллекта!

Вослед словам Господа о значащем времени¹¹ можно сказать «Но настанет время, и настало уже, когда люди будут поклоняться Искусственному Интеллекту в ложном «духе» и ложной «истине», ибо таких поклонников дьявол ищет на пути своем».

У автора нет сомнения, что искусственный интеллект, продвигаясь во времени, рано или поздно создаст технологии и материалы по клонированию частей человека и замены их в человеке, что приведет к практической бессмертию людей на Земле. ИИ решит и те задачи, которые человеку недоступны в принципе из-за огромных баз входных данных и очень большого времени поиска решений. Кто же откажется от бессмертия на Земле?

Человеку, освободившемуся от грехов, раскаявшемуся в грехах, человеку, изменившемуся по образу и подобию Божьему, останется только интуиция, врожденное чувство красоты и гармонии, недоступные ИИ, и чистая совесть – не что иное, как голос Духа Утешителя из Святой Троицы, «и не знаешь, откуда приходит и куда уходит...».

Именно эта «божественная» чистота человека позволит ему дойти до подлинного Рая, и Господь призовет его к себе через Иисуса Христа: «Я есмь путь и истина и жизнь; никто не приходит к Отцу, как только через Меня»¹².

До каких пор может происходить замена частей в человеке и чтобы Господь не оставил его? Думается, до тех пор, пока в человеке останется хоть 1 живая клетка (или минимальная группа клеток) мозга, в которой только и может жить Дух Божий, и которая сможет осознать тот факт, что человек, он еще он еще человек Божий, раскаявшийся и изменившийся. А после последней клетки всё, ты уже не человек Божий, хоть и живешь бесконечно долго, и, может, даже клонируешь себе подобных. Создать человека, состоящего их живых клеток, вбирающего в себя Дух Божий, ни дьявол, ни искусственный «человек» не смогут, это дело Бога.

§ 2. Датировки и обоснование

Как долго ждать этого тихого Апокалипсиса, когда по идее дьявола на Земле исчезнут люди, а их копии будут жить бесконечно?

Как долго? Маловероятно, что люди придут к Апокалипсису через войны и пандемии или Господь пошлет на них гнев Свой на всю Землю, подобно тому, как послал на Содом и Гоморру. Господь Вседержитель всемогущ, дьявол силен, вряд ли они отдадут свою идею «бессмертия человека» тому же неразумному «человеку разумному», ведь и сказал Бог: «Сотворим человека по образу Нашему и по подобию Нашему... И сотворил Бог человека по образу Своему, по образу Божию сотворил его; мужчину и женщину сотворил их»¹³. Но если «по образу и подобию», то идея бессмертия человечества имеет право на существование и более того приоритетна.

Каким образом? Иисус Христос говорит при первой встрече с учениками, будущими Апостолами:

- Симон, сын Ионин, ты наречешься Кифа, что значит камень (Петр)¹⁴ и Я говорю тебе: ты — Пётр, и на сём камне Я создам Церковь Мою, и врата ада не одолеют её¹⁵.

¹¹ Евангелие от Иоанна. 4:23 «Но настанет время, и настало уже, когда истинные поклонники будут поклоняться Отцу в духе и истине, ибо таких поклонников Отец ищет»

¹² Евангелие от Иоанна. 14:6

¹³ Ветхий Завет. Бытие 1:26-27.

¹⁴ Евангелие от Иоанна. 1:42

¹⁵ Евангелие от Матфея 16:18

Значит, Иисус создавал церковь на Земле. И, по обновленным данным, создавал ее от рождения Своего не 33 года, как считалось ранее, а 39 или 40 лет. Логично предположить, что Господь призвал Христа к себе именно на середине Его земного пути.

Тогда логично предположить, что и Свою церковь на Небесах Христос будет создавать и уже создает всю вторую половину Своей «земной», т.е. те же 40 лет. «В доме Отца Моего обителей много. А если бы не так, Я сказал бы вам: Я иду приготовить место вам»¹⁶

Итак, с высокой вероятностью можно считать, 80 лет – это время жизни Христа, Христа, как человека. Бесконечные скорости передвижения – это скорости Духа святого и Господа Бога нашего. Христос, как наполовину человек не может так быстро передвигаться, но Он и Бог. Тогда логично предположить, что Он строит церковь на Небесах, передвигаясь Там со световой скоростью.

Как долго? Один год передвижения на Небе со световой скоростью равен, по теории относительности, 387 годам на Земле. Умножим $40 \times 387 = 15480$. Итак, на строительство Церкви на Небесах Христу понадобится примерно 15 тысяч ЗЕМНЫХ лет. Две тысячи из них уже прошло. Осталось 13 тыс. лет!¹⁷

Таким образом, примерно 13 тыс. лет осталось людям Земли до Апокалипсиса. За эти 13 тыс. лет ИИ полностью тихо овладеет миром. Исчезнет человек, как человек Божий, но искусственный Мир продолжит существовать, человек, руководствуясь своими пороками, сам не захочет остановить или ограничить ИИ, тем более этого не захочет сделать сам ИИ. Мы люди, сами по доброй воле придем к Апокалипсису, к тихому самоуничтожению в обмен на технологическое бессмертие! Заманчиво и страшно одновременно! Людям придется сделать выбор: остаться искусственным человеком здесь на Земле или отойти ко Господу в Иное царство Духа, когда Христос снизойдет во второй раз?

Но по силам ли такое сверхусилие для ИИ?

Принято считать, основываясь на приближенном статистическом анализе, что каждые 100 лет человечество на порядок увеличивает свои научно-технические возможности. Основой такого порядкового счета обычно прижимают число 2 (другие числовые основания порядка, например, 10, как в обыденной жизни, уж слишком пугают). При этом внутри каждого периода и на отдельных их сериях, и в целом на всем интервале времени развитие происходит по закону больших систем в соответствии с логистическим уравнением, известным также как уравнение Ферхюльста [40]. Имеет место своего рода фрактальность большой системы развития ИИ (в соответствии с основным законом философии – неравномерный переход от количественных изменений в качественные).

А общая сумма всех научно-технических знаний увеличивается во времени экспоненциально, т.е. как функция $() = \cdot 2$, где - некоторая константа (точное значение которой не играет здесь роли), а - число столетий. Таким образом, если сегодня (2025 год) объем знаний человечества составляет порядка $2^2 = 4$ условных единиц, то 150 веков общий

¹⁶ Евангелие от Иоанна. 14:2

¹⁷ Любопытно вспомнить, что число 15 тыс. лет до «окончания человечества» уже сплывало много лет назад в беседе автора с (ныне покойным) проф. философии Чамкиным В.Ф по поводу основного философского «Закона отрицания отрицания» в приложении к развитию человеческой цивилизации. Автор доказывал, что спираль общественного и социального развития не просто повторяется на новом уровне качества, но и медленно (в больших системах быстр ничего не происходит) сжимается от цикла к циклу.

- И наступит время, лет, эдак, через 15 000, когда диаметр спирали будет столь мал, что социальное развитие практически закончится, человечество зайдет в тупик, во временной и социальной тупик, наступит безвременье и хаос, выход из которого один – второе пришествие Иисуса Христа.

- Откуда 15 000?

- Не знаю. Вот только сейчас во время нашего разговора неожиданно, как-то сразу, без всякой аргументации пришло Откуда-то.

- Уж больно мало Вы нам отвели - 15 тыс. лет.

- Не я, а мы себе, прости Господи!

объем знаний человечества составит порядка 2^{150} , что больше, чем 10^{45} , т. е. больше, чем число 1 и 45 нулей сзади (песчинок на Земле и то меньше).

Общий объем знаний человечества составит порядка 2^{150} условных единиц. Это катастрофический объем! И большая часть из него, точнее практически почти всё, придется на ИИ, ибо человек не сможет содержать и обслуживать такие объемы информации. И значит, тема технологического бессмертия человека или, по крайней мере, продолжительности жизни сопоставимой с бессмертием (практическое бессмертие) будет ИИ «по плечу».

При этом маловероятно, что в теме технологического бессмертия будут присутствовать те предельные состояния, о которых мы писали выше, и которые никакому ИИ и никакому человеку не доступны.

Заключение ко второй части

Жизнь для Бога – это смирение. Жизнь для дьявола – это борьба. Выбор за человеком. Времени на выбор осталось не так мало, но и не так много – 13 тысяч лет.

Библиографический список

1. Метафизика. Век XXI. Альманах. Вып. 4: метафизика и математика / под ред. Ю. С. Владимирова. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2011. – 463 с.: илл.
2. Суворов Л. Н. Вопросы диалектики в «Философских тетрадах» В. И. Ленина. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1960. - 167 с.
3. Smale, S. "Mathematical Problems for the Next Century." *Math. Intelligencer* **20**, No. 2, 7-15, 1998.
4. Миронов В. В. Фундаментальные математические проблемы. Комментарии / Препринт. Первая редакция. – Рязань: РГРТУ, Лаборатория системного анализа. 2021. – 410 с.
5. Большой латинско-русский словарь. *Vocabulari vmlatinor vssicvmmagnvm*. Дата обращения: 28 февраля 2025. Архивировано 21 ноября 2018 года.
6. Толковый словарь Ожегова онлайн. *Slovar ozhegova.ru*. Дата обращения: 28 февраля 2025. Архивировано 6 января 2017 года.
7. Толковый словарь Даля/ онлайн.*slovardalja.net*. Дата обращения: 6 января 2024. Архивировано 6 января 2017 года.
8. *Encyclopaedia Britannica*, Архивная копия от 19 октября 2024 на Wayback Machine.
9. Г. Азимов, А. И. Щукин. Словарь методических терминов Архивная копия от 12 января 2018 на WaybackMachine, 2002.
10. Рассел, С. Искусственный интеллект. Современный подход; в 3 т. Издательство: Диалектика, 2021 г. ISBN 978-5-907365-24-7..
11. Искусственный интеллект превзойдет возможности человеческого мозга. *Cable News Network* (26 июля 2006 г.)
12. Основы Тьюринга: идеи, положившие начало компьютерной эре. – Оксфорд, Англия: Кларендон Пресс, 2004. – ISBN 0-19-825079-7
13. Каплан, Андреас. Искусственный интеллект, бизнес и цивилизация: наша судьба, созданная машинами. – Нью-Йорк: Рутледж, 2022. – ISBN 978-1-000-56333-7.
14. Искусственный интеллект в России: технологии и рынки / Л. М. Гохберг (рук. авт. колл.), Ю. В. Туровец, К. О. Вишневский и др.; науч. ред. Л. М. Гохберг; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». – М.: ИСИЭЗ ВШЭ, 2025. – 148 с.
15. М. Эндрю. Реальная жизнь и искусственный интеллект // «Новости искусственного интеллекта», РАИИ, 2000.
16. Валитов Н. Х. Вакуумные колебания при химическом возбуждении атомов, молекул и хаотичность силовых линий электромагнитного и гравитационного поля / Н. Х. Валитов; Акад. наук Респ. Башкортостан, Отд-ние химии. - Уфа : Гилем, 1997. - 99 с.
17. David Hilbert. Vortrag, gehalten auf dem internationalen Mathematiker-Kongreß zu Paris 1900 — Текст доклада, прочитанного Гильбертом 8 августа 1900 года на II Международном конгрессе математиков в Париже. Дата обращения: 27 августа 2024. Архивировано 8 апреля 2012 года.
18. Матиясевич Ю. В. Диофантовость перечислимых множеств // Доклады Академии наук СССР. 1970. Т. 191. № 2.С.. 279—282.

19. Миронов В. В. Сильнополиномиальный алгоритм решения общей задачи наименьших модулей (в 2-х частях) // Сибирский журнал вычислительной математики. 2010. Т. 13. №2. Часть I, С.161-174; Часть II, С.174-181.
20. Атья М. Геометрия и физика узлов. — М.: Мир, 1995. — 192 с.
21. Суханов А. Д. Новый подход к соотношению неопределённостей энергия-время. — Физика элементарных частиц и атомного ядра. — 2001. Том 32. Вып. 5. С. 1177.
22. Балханов В.К. Основы фрактальной геометрии и фрактального исчисления/ отв. ред. Ю.Б. Башкуев. – Улан-Удэ: Изд-во Бурятского госуниверситета, 2013. - 224 с.
23. McCarthy, John. Epistemological problems of artificial intelligence - Computer Science Department Stanford University Stanford, CA 94305.
24. Principles of Semantic Networks: Explorations in the Representation of Knowledge. John F. Sowa (Editor). Morgan Kaufmann. 2014. P. 594.
25. Нечаев Ю.И., Дегтярев А.Б. Интеллектуальные системы: концепция и приложения. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2013. - 269 с.
26. Penrose, R. The Emperor's New Mind. - Penguin Books. 1991.
27. Costa N. da and Doria, F. Undecidability and Incompleteness in Classical Mechanics. - Internat. Jour. Theoretical Physics. 1991. 30. P. 1041-1073.
28. Пиньейро Г. Э. У интуиции есть своя логика. Гёдель. Теоремы о неполноте // Наука. Величайшие теории. — М.: Де Агостини, 2015. — Вып. 17.
29. Grötschel, M., Lovasz, L., and Schrijver, A., Geometric Algorithms and Combinatorial Optimization, Springer-Verlag, New York. 1993.
30. Ефимов А.Р. Постстыуринговая методология: разрушение стены на пути к общему искусственному интеллекту // Интеллект. Инновации. Инвестиции, 2020. № 2. С. 74–80.
31. Кузнецов Б. Г. Основные идеи квантовой механики // отв. ред. Григорьян А. Т., Полак Л. С. Очерки развития основных физических идей. - М., АН СССР, 1959. - С. 390-421.
32. С. Смейл. О проблемах вычислительной сложности // Матем. просвещение., сер. 3, 4. 2000, С. 115 – 119.
33. Сборник статей по математической логике и ее приложениям к некоторым вопросам кибернетики [Текст] / [Отв. ред. канд. физ.-матем. наук С. В. Яблонский]. - Москва: Изд-во Акад. наук СССР, 1958. - 362 с.
34. Миронов В.В. Новые алгебры логики на индексированных логических множествах. // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2022 [текст]: сб. тр. V междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.5./ – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2022. С. 29 – 43.
35. Миронов В.В. Новые некоммутативные алгебры логики. // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2022 [текст]: сб. тр. V междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.5./ – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2022. С. 43 – 54.
36. 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: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2022. С. 54 – 69.
37. Миронов В.В. Конечные, конечномерные и конечнопорожденные абелевы алгебры логики. // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2022 [текст]: сб. тр. V междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.5./ – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2022. С. 69 – 76.
38. Миронов В.В., Тарасов В.В. Синтез надежных схем и антивирусов в системах передачи информации / Препринт. Первая редакция. – Рязань: РГРТУ, Лаборатория системного анализа. - 2023. – 240 с.
39. Алехина М.А. О надежности схем из ненадежных функциональных элементов при однотипных константных неисправностях на выходах элементов // Дискретная математика. - 1993. - Т. 5, вып. № 2. - С. 59-74.
40. Дроздук А. Логистическая кривая. – Торонто: Choven, 2019. – vi + 271 + [3] с.

СЕКЦИЯ «ОБРАБОТКА ДАННЫХ, ИЗОБРАЖЕНИЙ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»

УДК 621.371; ГРНТИ 49.03.05

АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ НЕСКОЛЬКИХ СИГНАЛОВ В СИСТЕМЕ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

В.К. Клочко

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

Аннотация. В работе рассмотрен алгоритм обнаружения нескольких гармонических сигналов, принятых по каналу связи с разной временной задержкой и частотой. Сигналы могут быть плохо различимы как по времени прихода, так и по частоте. Полезная информация заключается в частоте и фазе сигналов. Обнаружение сигналов по сравнению с известными алгоритмами отличается параллельной обработкой сигналов во временной и спектральной областях с объединением полученных результатов. С помощью компьютерного моделирования показано преимущество предложенного алгоритма.

Ключевые слова: суммарный сигнал, временная обработка, спектральная обработка, обнаружение сигналов, оценки параметров.

ALGORITHM FOR DETECTING SEVERAL SIGNALS IN THE DATA TRANSMISSION SYSTEM

V.K. Klochko

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

The summary. The paper considers an algorithm for detection several signals received over a communication channel with different time delays and frequencies. The signals may be poorly distinguishable by both arrival time and frequency. The useful information lies in the frequency and phase of the signals. An increase in signal detection compared to known algorithms is achieved by processing signals in the time and frequency domains with the combination of the results obtained. Using computer simulation, the advantage of the proposed algorithm is shown.

Keywords: total signal, time processing, spectral processing, signal detection, parameter estimates.

Введение

При построении систем обработки нескольких периодических сигналов, переданных по линии связи, большое внимание уделяется методам обнаружения сигналов и оценивания их параметров. Обнаружение сигналов осуществляется как по времени их прихода, так и по частоте. Проблема обнаружения сигналов является традиционной, но интерес к ее решению не ослабевает. Хорошо зарекомендовал себя спектральный метод обнаружения сигналов по частоте с применением быстрого преобразования Фурье (БПФ) [1].

Существующие частотно-временные методы обнаружения нескольких периодических сигналов отличаются от метода обработки в спектральной области тем, что осуществляют интегральную спектральную обработку сигналов в окрестности текущих моментов времени, что позволяет проводить локальный частотно-временной анализ сигналов. Такими являются оконное преобразование Фурье и его модификации, а также вейвлет-преобразование. В плане обработки сигналов во временной области можно отметить такие известные методы, как MUSIC и EV [2], а также работы [3 – 5].

Целью работы является разработка алгоритма обнаружения нескольких гармонических сигналов, более эффективного по сравнению с известными алгоритмами обнаружения сигналов во временной и спектральной областях и реализуемого в обычной вычислительных среде. В работе представлены результаты, адаптированные на основе [6, 7] к системе передачи данных.

Модель сигнала и временная обработка

Принятый по каналу связи суммарный гармонический сигнал после дискретизации по времени имеет следующий вид [6]:

$$y(t_i) = \sum_{k=1}^m s_k(t_i - \tau_k) + p(t_i) = \sum_{k=1}^m A_k \cos(\omega_k t_i + \varphi_k + \varepsilon) + p(t_i),$$

где t_i – текущий i -й момент времени ($i = \overline{1, n}$, n – объем выборки);

τ_k – задержка k -го сигнала;

A_k – амплитуда k -го сигнала;

ω_k – частота k -го сигнала;

φ_k – фаза k -го сигнала;

ε – фазовый шум;

$p(t_i)$ – аддитивный шум;

m – неизвестное количество сигналов.

Задача заключается в обнаружении всех сигналов, присутствующих в составе принятого суммарного сигнала, то есть нахождении оценки \hat{m} числа сигналов и оценок параметров $\hat{\omega}_k$, $\hat{\varphi}_k$, каждого их них ($k = \overline{1, \hat{m}}$). Для частного случая $m = 1$ известен оптимальный по критерию Неймана – Пирсона метод обнаружения момента времени τ прихода сигнала и оптимальный по методу максимального правдоподобия метод оценивания параметров сигнала ω , φ [1], но реализовать оптимальные методы для неизвестного числа сигналов трудно. Поэтому в работе предлагается, по сути, эвристический алгоритм обнаружения нескольких сигналов с оцениванием их параметров, эффективность которого проверяется в сравнении с известными алгоритмами путем компьютерного моделирования.

В основе алгоритма лежит способ [6, 7] обнаружения нескольких сигналов во временной области, в соответствии с которым из входного сигнала формируется дискретная выборка, элементы выборки фильтруются и обнаруживаются моменты времени τ_k появления k -х сигналов ($k = \overline{1, \hat{m}}$), затем на каждом k -м промежутке времени $[\tau_k, \tau_{k+1})$ присутствия k -го сигнала находятся оценки частоты и фазы сигнала, причем сам сигнал выделяется путем вычитания из отфильтрованного суммарного сигнала экстраполированных оценок сигналов, обнаруженных ранее. Для оценивания фазы выделенного сигнала используется фильтр Калмана, настроенный на гармоническую модель сигнала [3 – 5].

Обзор известных методов

Для обзора и сравнения известных методов моделировалась три последовательно во времени принятых сигнала (отсчет времени ведется по горизонтальной оси), имеющие близкие частоты. На рисунке 1 “а” и “б” показана работа оконного преобразования Фурье и вейвлет-преобразования при визуальном обнаружении трех сигналов по частоте (отсчет частоты ведется по вертикальной оси) в компьютерной среде MatLab. На рисунке 1 “в” показана работа методов MUSIC и EV также при визуальном обнаружении сигналов по частоте (отсчет частоты ведется по горизонтальной оси, отсчет амплитуды – по вертикальной). Здесь также все сигналы не различаются по частоте. На рисунке 1 “г” показано разрешение тех же трех сигналов по частоте с помощью БПФ (частота дана в Гц). В случае БПФ преобразование позволило визуально обнаружить все три сигнала (рисунок “г”). Именно БПФ выбрано для улучшения указанного выше способа [6, 7] обнаружения сигналов. В предлагаемом алгоритме соединяются два подхода – временной и спектральный (БПФ) по принципу вероятностной

логики: вероятность появления хотя бы одного желаемого события (обнаружения всех сигналов) выше, чем вероятность появления каждого из них в отдельности.

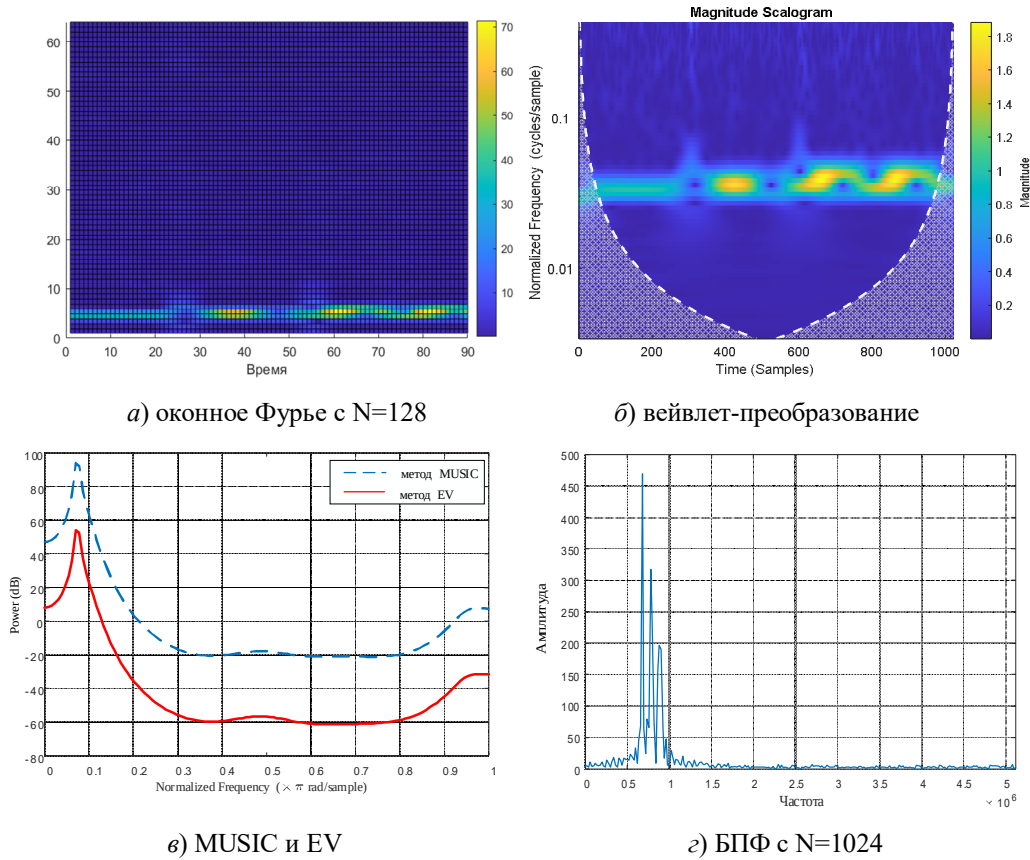


Рис. 1. Сравнение известных методов

Алгоритм обнаружения нескольких сигналов

Алгоритм обнаружения нескольких сигналов сводится к следующему.

Принимаемая по линии связи последовательность $\{y(t_i)\}$ поступает на вход экспоненциального фильтра нулевого порядка, который оценивает среднее значение сигнала и проверяет гипотезу о нулевом среднем [5]. Фильтр обнаруживает момент времени τ_1 появления первого сигнала $s_1(t_i - \tau_1)$, $t_i \geq \tau_1$, на фоне шума $p(t_i)$.

С момента времени τ_1 начинает работать второй экспоненциальный фильтр, непрерывно сглаживающий $y(t_i)$ по модели 2-го порядка с целью подавления шума $p(t_i)$. На основе сглаженного сигнала $\tilde{y}_1(t_i) = s_1(t_i - \tau_1) + \tilde{p}_1(t_i)$, $t_i \geq \tau_1$, где $\tilde{p}_1(t_i)$ – ошибка сглаживания, находятся оценки полупериода сигнала и частоты $\hat{\omega}_1$. Вычисляется остаточный сигнал

$$e_1(t_i) = y(t_i) - \tilde{y}_1(t_i),$$

который поступает на вход экспоненциального фильтра нулевого порядка для обнаружения момента времени τ_2 прихода второго сигнала.

Параллельно сглаженный сигнал $\tilde{y}_1(t_i)$, $q = \overline{1, Q}$, $\tau_1 < t_i < \tau_2$, поступает на вход фильтра Калмана. Фильтр настроен на модель сигнала [2] вида

$$s_1(t_i - \tau_1) = a_i \cos \hat{\omega}_1 t_i + b_i \sin \hat{\omega}_1 t_i,$$

где $\hat{\omega}_1$ – найденная оценка частоты; a_i и b_i – параметры, которые считаются случайными в силу калмановской модели.

Модель измерения имеет вид

$$\tilde{y}_1(t_i) = H_i X_i + \tilde{p}_1(t_i),$$

где $H_i = (\cos \hat{\omega}_1 t_i \quad \sin \hat{\omega}_1 t_i)$; $X_i = (a_i, b_i)^T$ – меняющийся вектор состояния:

$$X_{i+1} = A X_i + W_i, \quad A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где W_i – вектор случайных изменений параметров с заданной ковариационной матрицей.

Фильтр Калмана рекуррентно находит оценку вектора состояния $\hat{X}_i = (\hat{a}_i, \hat{b}_i)^T$. Оценки параметров \hat{a}_μ, \hat{b}_μ в установленный момент времени $t_i = t_\mu$, $\tau_1 < t_\mu < \tau_2$, используются для определения фазы первого сигнала: $\hat{\psi}_1 = \arctg(\hat{a}_\mu / \hat{b}_\mu)$.

Параллельно по остаточному сигналу $e_1(t_i)$, $t_i > \tau_1$, обнаруживается момент времени τ_2 прихода второго сигнала $s_2(t_i - \tau_2)$, $t_i \geq \tau_2$. Вычисляются экстраполированные оценки первого сигнала:

$$\hat{s}_1(t_i - \tau_1) = \hat{a}_\mu \cos \hat{\omega}_1 t_i + \hat{b}_\mu \sin \hat{\omega}_1 t_i, \quad t_i > \tau_2.$$

С момента $\tau_2 + \Delta t$, где задержка Δt предусматривает переходный процесс, из сглаженного входного сигнала $\tilde{y}_q(t_i)$ вычитается запомненный экстраполированный первый обнаруженный сигнал. Получается оценка второго сигнала $s_2(t_i - \tau_2)$:

$$\hat{s}_2(t_i - \tau_2) = \tilde{y}_q(t_i) - \hat{s}_1(t_i - \tau_1), \quad t_i \geq \tau_2 + \Delta t.$$

Для сигнала $\hat{s}_2(t_i - \tau_2)$ находится оценка частоты $\hat{\omega}_2$ и сигнал $\hat{s}_2(t_i - \tau_2)$ подается на вход фильтра Калмана, имея следующую модель:

$$\hat{s}_2(t_i - \tau_2) = a_i \cos \hat{\omega}_2 t_i + b_i \sin \hat{\omega}_2 t_i.$$

Фильтр Калмана оценивает фазу $\hat{\phi}_2$ второго сигнала.

Параллельно идет сглаживание суммарного сигнала $y(t_i)$ при $t_i \geq \tau_2$ вторым экспоненциальным фильтром и образуется сглаженный сигнал

$$\tilde{y}_2(t_i) = s_1(t_i - \tau_1) + s_2(t_i - \tau_2) + \tilde{p}_2(t_i), \quad t_i \geq \tau_2.$$

Вычисляется остаточный сигнал

$$e_2(t_i) = y(t_i) - \tilde{y}_2(t_i),$$

который подается на первый экспоненциальный фильтр. Обнаруживается момента времени τ_3 прихода третьего сигнала.

И т. д. ведется обработка суммарного сигнала на периоде его наблюдения во временной области. В результате находятся оценки числа сигналов \hat{m}_t как число обнаруженных моментов времени $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{\hat{m}_t}$, а также оценки частоты и фазы $\hat{\omega}_{tk}, \hat{\phi}_{tk}$, $k = \overline{1, \hat{m}_t}$.

Параллельно принимаемый сигнал $y(t_i)$, $i = \overline{1, n}$, подается на вход БПФ и переводится в спектр $\dot{S}(\omega_j)$, $j = \overline{1, n_1}$, $n_1 > n$. Обнаруживаются спектральные составляющие спектра по превышению их амплитуд $|\dot{S}(\omega_{jk})|$ заданного порога и определяются фазы $\varphi_{jk} = \arg \dot{S}(\omega_{jk})$, $j_k = \overline{1, \hat{m}_\omega}$. Далее используется следующее решающее правило.

Если $\hat{m}_\omega > \hat{m}_t$, то принимаются оценки, найденные в спектральной области как более точные.

Если $\hat{m}_t > \hat{m}_\omega$, то оценки $\hat{\omega}_{tk}, \hat{\varphi}_{tk}$, $k = \overline{1, \hat{m}_t}$, найденные во временной области, идентифицируются по критерию близости с оценками $\hat{\omega}_k, \hat{\varphi}_k$, $k = \overline{1, \hat{m}_\omega}$, найденными в спектральной области. В результате определяются \hat{m}_t оценок, найденных в спектральной области, которые дублируются оценками, найденными во временной области. Предпочтение отдается оценкам, найденным в спектральной области. Остальные $\hat{m}_t - \hat{m}_\omega$ оценок параметров, не прошедшие идентификацию, берутся из временной области.

Результаты моделирования

Осуществлялось компьютерное моделирование рассмотренного алгоритма в трех режимах работы: первый режим – это обработка сигнала только в спектральной области, второй – только во временной области и третий – совместная обработка в спектральной и временной областях. Моделировался суммарный сигнал с шагом дискретизации $1/2 f_{\max}$, где $f_{\max} = 10$ кГц, при 5000 реализаций дискретного белого шума $p(t_i) \sim N(0, \sigma_p^2)$ и фазового шума ε , который действовал по равномерному закону на $[0, \pi/10]$. Находилась оценка \hat{P} вероятности правильного обнаружения всех сигналов, понимаемая как доверительная вероятность попадания оценок параметров всех m сигналов в интервалы, определенные потенциальной точностью измерения частоты и фазы [1].

На рисунке 2 даны зависимости оценки \hat{P} вероятности обнаружения всех трех сигналов от отношения сигнал-шум для трех режимов работы. Результаты моделирования показывают повышение вероятности обнаружения всех сигналов с 0,63 до 0,86 при $m = 3$ на уровне отношения сигнал-шум $\mathcal{G} = 14 - 20$ (дБ) за счет совместной обработки сигналов во временной и спектральной областях. Повышение вероятности обнаружения согласуется с вероятностной логикой появления хотя бы одного из двух независимых и соответственно совместных событий.

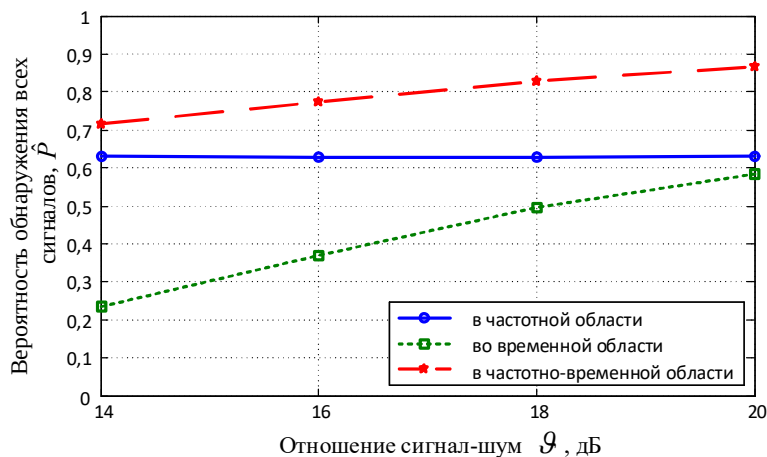


Рис. 2. Зависимость \hat{P} от отношения сигнал-шум при $m = 3$

Заключение

В соответствии с подходом к обнаружению нескольких сигналов, основанным на совместной обработке принятого суммарного сигнала во временной и спектральной областях, рассмотрен алгоритм реализации данного подхода. Во временной области из суммарного сигнала последовательно выделяются отдельные сигналы, которые в последующем экстраполируются и вычитаются из общей суммы. В спектральной области обнаруживаются сигналы с разной частотой и оцениваются их фазы. Совместная обработка заключается в идентификации сигналов, выделенных в двух областях и имеющих близкие частоты и фазы. Показано компьютерным моделированием преимущество совместной обработки в двух областях по сравнению с отдельной обработкой. Алгоритм может найти применение в системах обработки сигналов, переданных по линии связи.

Библиографический список

1. Бакулев П. А. Радиолокационные системы. Учебник для вузов. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2015. 440 с.
2. Методы и алгоритмы цифрового спектрального анализа сигналов: учебное пособие / В. И. Кошелев. М.: КУРС, 2021. 144 с.
3. Кузнецов В. П., Чураков Е. П. Система фильтров Калмана для оценки параметров отраженного сигнала // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 1 (Вып. 51). С. 9-14.
4. Клочко В. К., Кузнецов В. П., Левитин А. В. и др. Алгоритмы определения координат движущихся целей на базе многоканальной доплеровской РЛС // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 3 (Вып. 53). С. 3 – 10.
5. Клочко В. К., Кузнецов В. П., Ву Ба Хунг. Оценивание параметров радиосигналов от подвижных маловысотных объектов // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2022. Вып. 80. С. 12 – 23.
6. Клочко В. К., Ву Б. Х. Частотно-временная обработка сигналов в доплеровском радиоприемнике // Цифровая обработка сигналов. 2023. № 2. С. 15 – 21.
7. Клочко В.К., Ву Б.Х. Исследование частотно-временной обработки сигналов в системе доплеровских приемников // Цифровая обработка сигналов. 2024. № 4. С. 33 – 39.

УДК 621.383.72 + 523.682 ГРНТИ 41.51.27

ПАРАМЕТРЫ КАМЕР ДЛЯ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ В МЕТЕОРНОЙ АСТРОНОМИИ

В.С. Жабин*, А.К. Муртазов**

*Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина,
РФ, Рязань, *slavkaj@yandex.ru, **akmurtazov@gmail.com*

Аннотация. Определены спектральные характеристики ПЗС-камеры Watec-902H, дисторсия для различных объективов. Оценены возможности фотометрических измерений при мониторинге метеорных явлений с ее использованием. Оценена линейность фотометрической характеристики камеры, ее проникающая способность и вероятность обнаружения движущихся объектов.

Ключевые слова: метеоры, мониторинг, ПЗС-камера.

PARAMETERS OF THE CAMERAS FOR PHOTOMETRIC MEASUREMENTS IN METEOR ASTRONOMY

V.S. Zhabin*, A.K. Murtazov**

*Ryazan State University named after S. Yesenin, Ryazan, Russian Federation
*slavkaj@yandex.ru, **akmurtazov@gmail.com*

Abstract. The spectral characteristics and distortion for different lenses of CCD-camera Watec-902H are measured. The possibilities of meteor photometric measurements using CCD-camera Watec-902H are assessed. We investigated the camera photometric linearity, limiting magnitude, and fast-moving objects detection probability.

Key words: meteors, monitoring, CCD-camera.

Введение

Наблюдения метеорных явлений являются массовыми и достаточно широко распространенными в мире. Регистрация таких событий производится различными методами, но наиболее удобным является их регистрация ПЗС-камерами. Результаты измерений позволяют при обработке определять параметры метеорных тел, сгорающих в атмосфере – траекторию движения метеороидов в атмосфере, радианты метеорных потоков и, в конечном счете, их массу орбиты в Солнечной системе. Точность фотометрических измерений яркости метеоров являются здесь основополагающей при определении физических параметров метеороидов и их орбит.

Метеорные явления являются быстропротекающим процессом. При геоцентрической скорости движения метеороидов до ≈ 72 км/с угловая скорость их движения на небесной сфере весьма высока. Например, геоцентрическая скорость частиц в наиболее известном метеорном потоке Персеиды составляет ≈ 60 км/с. На небесной сфере это максимально соответствует 27 град/с, что налагает определенные требования к системе обнаружения, регистрации и фотометрии метеоров.

ПЗС-камеры Watec-902H – общие характеристики

Для мониторинга метеорных явлений наиболее распространенной в мире является 1/2'' ПЗС-камера *Watec-902H* на базе матрицы *ICX-249AL ExView* компании *Sony* с размером пиксела 8.6 мкм (Г) x 8.3 мкм (В), чересстрочной разверткой и разрешением в телевизионном режиме 570 ТВЛ при освещенностях до 0.0001 лк [6, 14].

Чувствительность для большинства промышленных и бытовых камер определяется при отношении «сигнал-шум» $S/N \approx 50$ дБ и в наилучшем случае, по данным фирм-изготовителей, составляет величину порядка 10^{-3} лк. Падение чувствительности от центра к краю поля зрения пропорционально $\cos^4(r - r_0)$ [12].

Дисторсия на краю поля зрения при использовании различных объективов составляет величину от 0.6° для 12-мм объектива и 1/2'' камеры до 10° в случае использования 3-мм объектива [6, 8, 16].

Спектральная чувствительность камеры *Wat-902H2* в комплекте со стеклянными объективами, измеренная нами, в сравнении со спектральной чувствительностью матрицы и спектральным окном пропускания атмосферы в оптической области [12] приведена на рисунке 1.

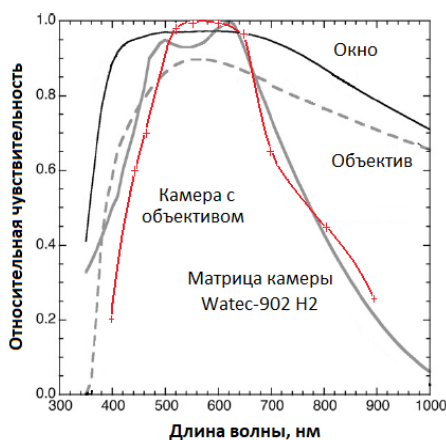


Рис. 1. Спектральная чувствительность камеры *Wat-902H2* со стеклянным объективом (красная кривая)

Физический размер ПЗС-ячеек является основным параметром, определяющим требования к разрешающей способности объектива. Другим таким параметром может явиться тре-

бование по обеспечению работы матрицы в условии световой перегрузки, которое будет рассмотрено ниже. Для 1/2 дюймовой матрицы *SONY* размер пиксела составляет 8,6мкмХ8,3мкм и объектив должен иметь разрешение лучше, чем $\frac{1}{8.3 \cdot 10^{-3}} = 120$ линий (60 пар) на мм. Для объективов, сделанных под 1/3-дюймовые матрицы, это значение должно быть еще выше.

Для малой оптики (телескопы и объективы диаметром до 10 см) размер пиксела должен соответствовать размеру пятна, которое для совершенной оптической системы является диаметром пятна Эйри, т.е. изображения, созданного совершенным точечным источником (звездой). Размер *R* пятна для $\lambda=550$ нм

$$R = \frac{1,38K}{t}, \quad (1)$$

где *R* - диаметр пятна Эйри, мкм;

K - диафрагменное число;

t - коэффициент подгонки.

Адекватная выборка соответствует размеру изображения звезды вдвое большему размеру пиксела.

Согласно теореме Найквиста-Котельникова, аналоговый сигнал может быть без потерь восстановлен (передан) дискретным сигналом с вдвое меньшей частотой [4] для оптимальной работы нужно иметь, по крайней мере, два пиксела поперек полуширины изображения звезды (для практических целей - от 2,5 до 3 пиксел). Объективы различных фирм для 1/2" и 1/3" матриц создают изображения точечных звезд размерами по критерию Найквиста не менее 3 пиксел поперек их полуширины [5, 6].

На рис. 2 представлено распределение яркости изображений звезд различного блеска на единичных фреймах, полученных 1/3" камерой KPC-650BH с объективом SSE0612NI F1.2. в сравнении с распределением фона.

Распределение яркости здесь близко к нормальному, уверенно аппроксимируется гауссовыми функциями (относительная дисперсия колеблется в пределах 3%, коэффициент корреляции достаточно близок к 1) и удовлетворяет теореме Найквиста.

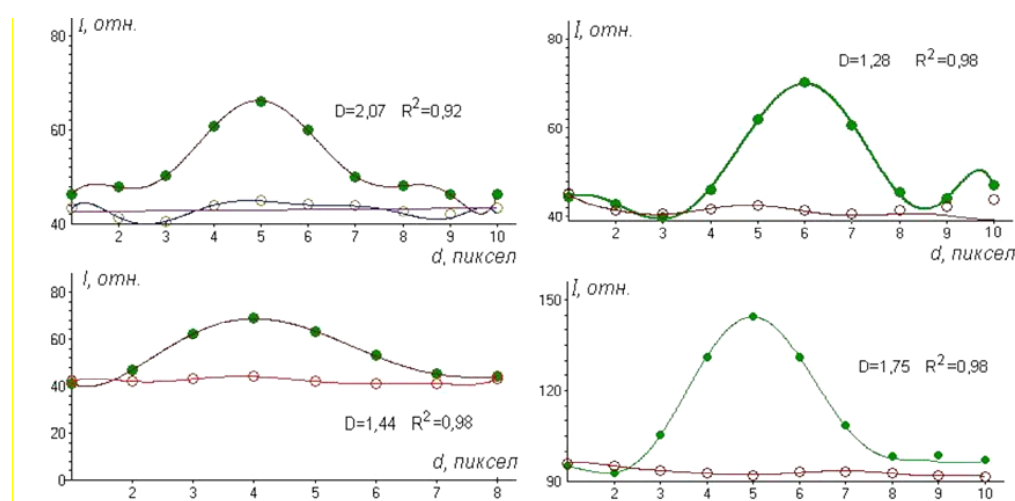


Рис. 2. Профиль изображений звезд различного блеска в сравнении с фоном для системы «камера KPC-650BH - объектив SSE0612NI F1.2.»

В этом случае среднее значение измеренного блеска совпадает с медианой и модой распределения, мало зависит от яркости изображений звезд и их координат на фрейме. Поэтому поправку за апертуру при проведении фотометрирования можно не вводить.

Фотометрические характеристики метеорной камеры

Для регистрации метеоров используется специально разработанное компьютерное обеспечение, позволяющее захватывать и сохранять кадры с метеорами, проводить обработку полученных изображений, и далее определять координаты метеорных следов на небесной сфере, радианты метеорных потоков, траектории их полета над Землей, в конечном счете – орбиты метеороидов в Солнечной системе. Мы регистрировали метеоры используя программные обеспечение *UFO Capture* фирмы *SonotaCO* (http://sonotaco.com/soft/e_index.html).

В астрономии основными параметрами любого приемного устройства являются время накопления сигнала, отношение «сигнал-шум», возможность быстрой обработки полученных результатов. При использовании ПЗС-приемников, состоящих из большого числа пикселей, имеются некоторые особенности, позволяющие использовать их в широком диапазоне падающих световых потоков. Здесь сигнал от наблюдаемого объекта, проецируемого оптической системой на единичный пиксель за минимальное время накопления τ одного кадра, составляет $I(t) \cdot Q \cdot \tau$ электронов, где $I(t)$ – поток от объекта, Q – квантовый выход ПЗС-приемника. К нему добавляется сигнал, образованный аддитивным сложением тока от фона неба $I_{фон}$, теплового шума (иначе, темнового тока) $I_{ТТ}$, шумов считывания $I_{сч}$:

$$I_{ТТ} \cdot \tau + I_{фон} + Q \cdot \tau + I_{сч}. \quad (2)$$

Поскольку аппаратные шумы и фон неба являются дискретными и подчиняются закону нормального распределения [4], уровень шума на выходе ПЗС-приемника составляет $\sqrt{I_{ТТ} \cdot \tau} + \sqrt{I_{фон} \cdot Q \cdot \tau} + \sqrt{I_{сч}}$, а отношение «сигнал-шум» без учета шумов считывания

$$\frac{S}{N} = \frac{I(t) \cdot \tau}{\sqrt{I_{ТТ} \cdot \tau} + \sqrt{I_{фон} \cdot Q \cdot \tau}}. \quad (3)$$

Таким образом, чем ярче объект и чем больше время накопления сигнала, тем больше отношение «сигнал-шум» и выше вероятность его обнаружения. То есть при наблюдении слабых источников существенным фактором является время накопления сигнала или количество сложенных кадров (до насыщения канала измерения). Динамический диапазон между минимальным и максимальным значениями измеряемого сигнала, в котором сохраняется линейность световой характеристики, для ПЗС-матриц оценивался нами до 10^2 [7, 15]. Тепловые шумы снижаются охлаждением. В результате время единичной экспозиции может составлять от нескольких минут до нескольких часов. Этот случай реализуется в большинстве астрономических наблюдений и используется при ПЗС-наблюдениях астрономических объектов, имеющих достаточно малые собственные движения, включая астероиды, геостационарные спутники и мусор на геостационарных орбитах.

Предельная звездная величина $m_{пред}$ регистрируемых объектов зависит от эффективного диаметра телескопа D , квантовой эффективности приемника Q , размеров изображения звезды на матрице r , времени накопления t , принятого значения отношения сигнала к шуму S/N , а также от яркости фона неба m_{ϕ} [3, 10, 11]

$$m_{пред} = m_{\phi} + 2.5 \lg \frac{D \sqrt{Qt}}{(S/N)r}, \quad (4)$$

где r определяется стороной квадрата из целого числа пикселей, покрываемых изображением звезды, и выражается в секундах дуги. К примеру, реальная проникающая способность телескопа Шмидта (17/20 см) астрономической обсерватории Одесского университета с камерой *Watec LCL-902K* в телевизионном режиме (25 кадров в секунду) составляет $11,8^m$ в области V [2].

На рисунке 2 приведены результаты фотометрии неподвижных звезд при сложении 24 фреймов длительностью 0,02 с каждый в программном софте *IRIS* [9] с круговой диафраг-

мой. Учитывалось плоское поле, темновой ток и ток считывания. Фреймы получены покадровым разложением avi-файла, записанного программой UFO с камеры *Wat-902H* + объектив *Computar HG0808AFCS* (поле зрения системы $45^\circ \times 34^\circ$). Эта процедура аналогична процессу накопления заряда при длительных астрономических экспозициях.

Здесь представлено соотношение между звездной величиной неподвижных звезд (звездная величина уменьшается с увеличением их блеска) и их яркостью на изображении в виде отношения яркости звезды по отношению к окружающему фону (отношение «сигнал-шум»).

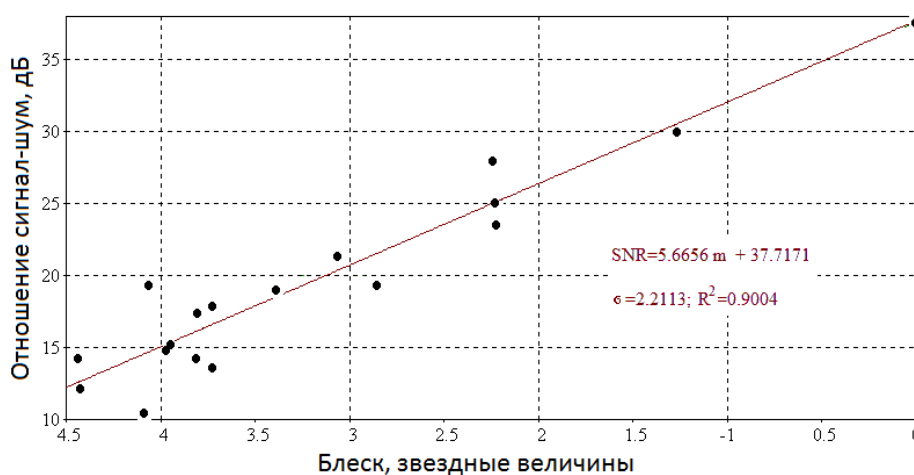


Рис. 2. Соотношение между блеском звезд и их яркостью на сложном изображении для камеры *Watec-902H*

Звездная величина определяется из формулы Погсона как

$$\Delta m = -2.5 \lg \frac{S}{N}, \quad (5)$$

а то же соотношение яркости объекта и фона (шума) на ПЗС-кадре

$$\Delta J = 20 \lg \frac{S}{N}. \quad (6)$$

Средние ошибки сглаживания составляют $0,05-0,10^m$, что близко к точности фотографической фотометрии.

Однако, в метеорной астрономии фотометрические измерения возможны только на единичных фреймах (полукадрах при чересстрочной развертке).

При угловой скорости метеора 24° c^{-1} (метеорный поток Персеиды) он будет зарегистрирован на одном кадре или двух фреймах. В оптической системе с $1/2''$ ПЗС и 8-мм объективом метеор будет зафиксирован \sim на 8 пикселах.

На рисунке 3 приведены результаты фотометрии неподвижных звезд на единичных фреймах (усредненные измерения по 24 полукадрам), использующиеся затем для фотометрии изображений метеоров на них.

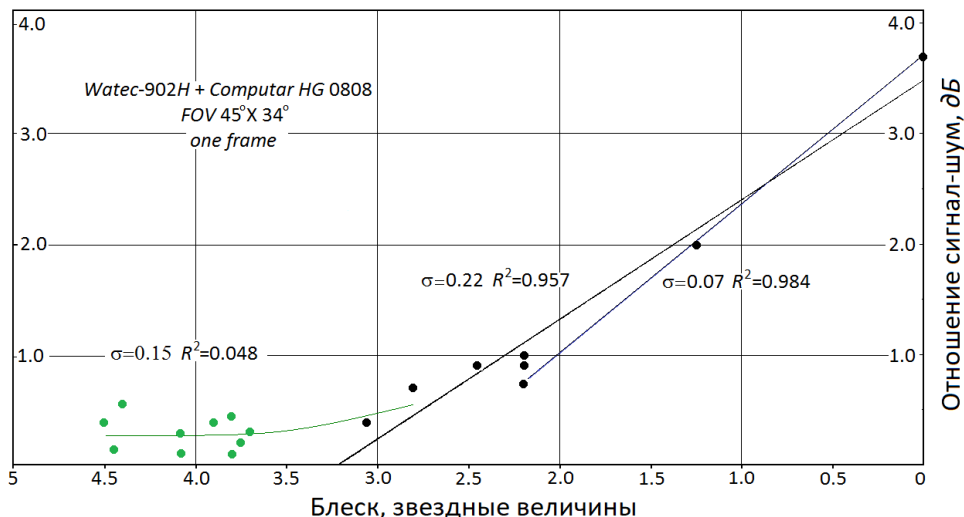


Рис. 3. Соотношение между блеском звезд и их яркостью на единичных фреймах

В отличие от сложеного изображения для единичных фреймов яркость объектов слабее 3,5 звездной величины не зависит от блеска звезд. Она резко изменяется при переходе от фрейма к фрейму и создает сильный эффект мерцания слабых звезд. Проницающая способность в этом случае не определяется однозначно и варьируется от 4.0m до 4.5m. Со стороны ярких объектов линейная зависимость «яркость-звездная величина» появляется, начиная со второй звездной величины и ярче [15]. Поскольку рабочий диапазон камеры Wat-902H, заявленный производителем, составляет 50 дБ, линейность должна сохраняться, по крайней мере, до звездной величины, соответствующей наиболее ярким звездам (Сириус – $m_v = -1.5$).

В итоге, точность фотометрии метеоров вблизи предельной минимальной и максимальной яркости низка и достигает 0.4-0.5 звездной величины, тогда как в середине этого диапазона в линейной части световой характеристики качество измерений улучшается, средняя квадратическая ошибка снижается до 0.05-0.01 звездной величины.

Таким образом, для звезд сравнения, находящихся на пределе обнаружения, когда $SNR = 20 \lg(S/N)$, дБ, близок к нулю (объект почти неразличим на фоне помех) и до $m \approx 3.5$ дБ зависимость блеска звезд сравнения от SNR нелинейна (рис. 3), что не позволяет проводить качественной фотометрии. На сложеном кадре метеора (рис. 2) различие между сигналом и фоном резко возрастает: сигнал возрастает пропорционально количеству кадров, а фон – пропорционально корню из числа кадров, что способствует повышению проницающей способности оптической системы. Световая характеристика оптической системы становится линейной, точность фотометрических измерений повышается. Это классический случай фотометрии астрономических объектов с накоплением сигнала. Однако, при метеорных исследованиях фотометрия проводится на единичных фреймах ввиду малого времени пребывания изображения метеора на фрейме.

В конечном счете, вероятность обнаружения и регистрации достаточно слабых по блеску метеоров (срабатывание аппаратуры при пролете метеора в кадре) является показателем надежности регистрации метеорных явлений и превышает 90% начиная с регистрации быстролетающих объектов ярче 2.5m [1].

Итоговые оптические характеристики метеорных комплексов на базе камеры Watec-902H представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры системы мониторинга метеорных явлений на базе ПЗС-камеры *Watec 902H*

Объектив	Поле зрения, град.	Дисторсия, град.	Проницающая способность фрейм/сложение кадров, зв. вел.	Максимальная спектральная чувствительность, нм	Вид мониторинга
<i>Computar HG0808AFCS</i>	45X34	0.6	4.0-4.5/7.5	550-600	Базовый мониторинг
<i>Computar T2314FICS</i>	140X100	10	2.5-3.0/3.8	550-600	Широко-угольный мониторинг

Выводы

При ПЗС-наблюдении слабых источников существенным фактором является время накопления сигнала или количество сложенных кадров (до насыщения канала измерения).

При фотометрии быстропротекающих метеорных событий время накопления не превышает периода кадровой развертки.

Фотометрия отдельных кадров из *avi*-файла показывает отсутствие линейности между звездными величинами звезд и их измеренными яркостями на кадре для звезд, находящихся на пределе видимости. Это не позволяет с достаточной точностью проводить измерения на пределе чувствительности.

Проницающая способность оптической метеорной системы «камера *Wat-902H* + объектив *HG0808*» при фотометрии на единичном фрейме составляет 4.0-4.5^m с достаточно большой дисперсией [1, 15]. Наиболее уверенно фотометрия метеоров осуществляется для событий от 2.5 до 0.0 звездной величины. Для очень ярких метеоров ошибки фотометрии резко увеличиваются.

На рисунке 4 приведены отдельные фреймы из *avi*-файла при регистрации пролета яркого болида в п. Сажнево Рязанской области 11.08.2013. Время накопления сигнала на одном фрейме 0.02 с, фреймы на рисунке 4 чередуются через 0.1 с. В правом нижнем углу кадра расположена Вега ($m=0.0$), внизу в центре – Денеб ($m=1.2$). Это самые яркие звезды северного полушария неба. Зафиксированный болид имел блеск, сравнимый с блеском Луны (-12^m), измерить который инструментальными методами с достаточной точностью невозможно.

Таким образом, согласно [13] можно отметить, что в отличие от различных систем усиления яркости изображения (ЭОПов) для регистрации слабых объектов, ПЗС-камеры не дают возможности регистрировать слабые метеоры с коротким следом, однако способны получать большие ряды наблюдений метеоров «среднего» блеска. Причем, ошибки при фотометрии как очень слабых, так и очень ярких метеоров, весьма значительны.

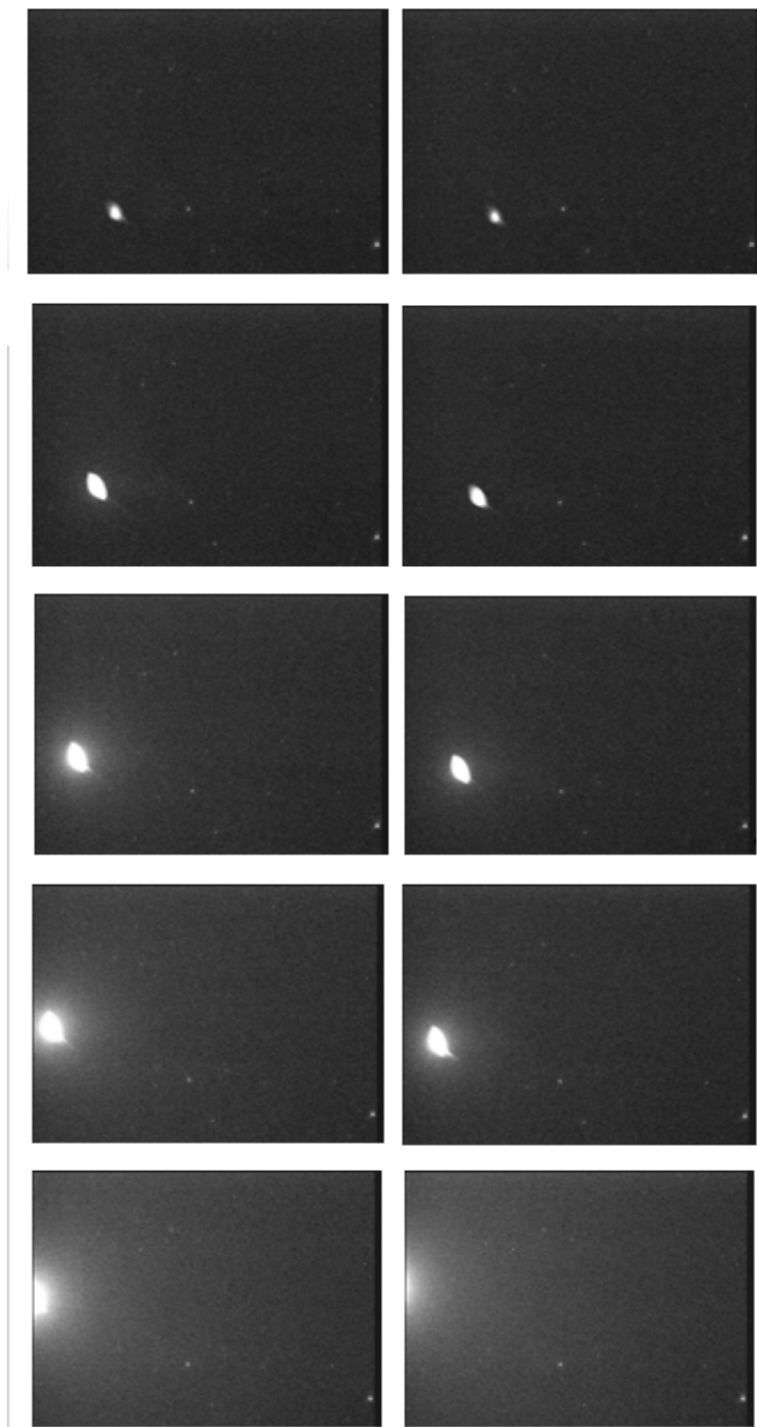


Рис. 4. Болид 11.08.20213 (камера Wat-902H+объектив HG0808, FOV 34°X45°)

Библиографический список

1. Жабин В.С., Муртазов А.К. Надежность регистрации быстролетающих объектов ПЗС-системой в метеорной астрономии // Надежность и качество сложных систем. - 2025, № 1.
2. Кошкин Н.И., Бурлак Н.Р., Мотрич В.Д., Драгомирецкий В.В., Науменко Т.Н., Терпан С.С. Стандартизация и калибровка фотометрических измерений околоземных космических объектов // II Международная научная конференция «Наблюдение околоземных космических объектов». - Звенигород, 22-24 января 2008.
3. Козак П.Н. О внутренней точности цифровой фотометрии метеоров по телевизионным наблюдениям // Кинематика и физика небесных тел. - 1998, Т. 14. № 6. - С. 553-563.

4. Малинин В.В. Моделирование и оптимизация оптико-электронных приборов с фотоприемными матрицами. – Новосибирск: Наука, 2006.
5. Миронов В.В., Муртазов А.К., Усовик И.В. Системные методы мониторинга околоземного космического пространства. – Рязань: Изд. Коняхин А.В. (Book Jet), 2018. – 312 с.
6. Муртазов А.К. Мониторинг загрязнений околоземного пространства оптическими средствами. Рязань: РГУ имени С.А. Есенина. - 2010. -252 с.
7. Муртазов А.К. Особенности оптического диапазона и организация метеорного мониторинга оптико-электронными средствами: Материалы III Международного научно-технического форума «Современные технологии в науке и образовании». - Рязань: РГРТУ, 2020. Т. 5. – С. 142-152.
8. Сухов П.П., Волков С.К., Карпенко Г.Ф. Использование широкопольных линзовых объективов для контроля космического пространства // Космічна наука і технологія. - 2010. Т. 16. № 3. - С. 55–58.
9. Buil C. IRIS - Astronomical image processing software. 2010.
10. Harris A. W. Evaluation of CCD systems for Near-Earth-Object surveys. - In: Report of Near-Earth Object Survey Working Group (Ed. E. M. Shoemaker), appendix III. 1995.
11. Howell S.B. Handbook of CCD astronomy. Cambridge University Press. 2006.
12. Jenniskens P., Gural P.S., Dynneson L., Grigsby B.J., Newman K.E., Borden M., Koop M., Holman D. CAMS: Cameras for All-sky Meteor Surveillance to establish minor meteor showers. Icarus. 2011. Vol. 216. P. 40-61.
13. Koseki M., Ueda M. and Shigeno Y. What is the difference between image intensifier and CCD meteors? III. How do meteor showers look like by image intensifiers and by CCD? WGN, the Journal of the IMO. 2010. Vol. 38:5. pp. 145-160.
14. Mullikin J.C., van Vliet L.J., Netten H., Boddeke F.R., van der Feltz G., Young I.T. Methods for CCD camera characterization”. In Titus H.C. and Waks A., editors, Proceedings of SPIE, 1994. Vol. 2173 “Image Acquisition and Scientific Imaging Systems”, pp. 73-84.
15. Murtazov A. K., Efimov A. V. Measurements of CCD optical linearity for magnitude determination during meteor observations. In: Proceedings of International Meteor Conference (IMC-2016). Egmond, the Netherlands, June 2–5, 2016. pp. 202–204
16. Yrjölä I. Meteor video camera. www.kolumbus.fi/oh5iy/astro/Ccd.html. Nov. 2003.

УДК 004.032.26:004.932.1: 620.179.152; ГРНТИ 28.23.37

КАЧЕСТВО ОБУЧЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ОБРАБОТКИ РАДИОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В.Д. Корчагин

*Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева,
Российская Федерация, Москва, valerak249@gmail.com*

Аннотация. В данной работе исследуется зависимость метрических показателей обучения искусственных нейронных сетей класса YOLO различных модификаций от объема и качества разметки обучающей выборки. Рассматриваются три модификации моделей: Nano, Small и Medium, для восьмой, десятой и новейшей одиннадцатой версий архитектуры. Приводится сравнительная оценка качества обучения на основе метрик LOSS, Precision и Recall с учётом ранее проведенных исследований. Особое внимание уделяется проблеме недостоверных данных в открытых датасетах и анализируется влияние некорректно размеченных примеров на численные показатели неопределенности модели. Проводится детальный анализ матрицы ошибок, что позволяет сделать вывод о наиболее проблемных зонах и причинах их появления.

Ключевые слова: неразрушающий контроль(NDT), разметка выборки, искусственные нейронные сети(ANN).

QUALITY OF TRAINING OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS FOR PROCESSING RADIOGRAPHIC IMAGES

V.D. Korchagin

*D. I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology,
Russia, Moscow, valerak249@gmail.com*

The summary. This paper describes the dependence of the metric learning performance of YOLO class artificial neural networks of various modifications on the size and quality of the training sample partitioning. Three modifications of the models are considered: Nano, Small and Medium,

for the eighth, tenth and the latest eleventh versions of the architecture. A comparative evaluation of training quality based on LOSS, Precision and Recall metrics is given, taking into account previous studies. Special attention is paid to the problem of unreliable data in open datasets and the influence of incorrectly labelled examples on the numerical indices of model uncertainty is analysed. A detailed analysis of the error matrix is carried out, which allows us to draw a conclusion about the most problematic areas and the reasons for their appearance.

Keywords: non-destructive testing (NDT), sampling markup, artificial neural networks (ANN).

В настоящее время наблюдается активный рост интереса к технологиями искусственных нейронных сетей (ИНС) в сфере неразрушающего контроля (НРК). Данное наблюдение является отражением глобального тренда цифровизации производства в рамках концепции NDT 4.0, которая предполагает модернизацию и интеграцию новейших наукоемких достижений в производственный сектор. Наиболее значимой проблемой современных методов НРК выступает высокая степень влияния человеческого капитала на конечный результат. Воздействие человеческого капитала на деятельность принято описывать «человеческим фактором», составляющим которого выступают профессиональные и личностные качества сотрудников. Поскольку большая часть актуальных методов базируется на проведении ряда процедур специализированной обработки с последующей визуальной оценкой структурной целостности и измерительных показателей исследуемого образца, специалист должен обладать высоким уровнем профессиональных компетенций и значительным практическим опытом для корректной оценки состояния объекта исследования. Данный процесс является трудоемким с точки зрения потребления человеческих ресурсов, что может приводить к некорректным результатам контроля ввиду фактора случайности, низкого уровня квалификации или усталости специалиста. Согласно исследованию [1], большинство предприятий малого и среднего бизнеса для управления факторами риска вкладываются в развитие технического оснащения для соответствия современным стандартам, а также в развитие человеческого капитала, поскольку 58% сотрудников испытывают нехватку профессиональных компетенций и требуют регулярного обучения и развития профессиональных качеств для достижения целевых показателей. Кроме того, в последние годы технологии ИНС продемонстрировали высокий уровень точности в задаче анализа и сегментации медицинских изображений, что является смежной областью исследований со сферой радиационного неразрушающего контроля. Подобные достижения способствовали повышению интереса отрасли к технологиям ИНС, что наглядно демонстрируется исследованиями Data Bridge Market Research[2]. Однако, общеизвестным фактом является высокая зависимость моделей ИНС от качества и разнообразия примеров в обучающей выборке.

В данной статье будет рассмотрен вопрос влияния репрезентативности и качества разметки выборки на итоговые результаты в разрезе с ранее полученными авторскими результатами.

НРК представляет собой совокупность диагностических мероприятий, объединяющих различные методы и формы контроля, целью которых является выявление дефекта в исследуемых образцах. На сегодняшний день, согласно данным [3], наиболее распространенными методами являются: визуально измерительный (33%), ультразвуковой (15%), радиографический (10%) и капиллярный (11%). Однако, несмотря на разнообразие применяемых подходов, многие современные методы либо заменяются аналогами за счет внедрения передовых научных достижений, либо подвергаются значительной автоматизации и цифровизации. Информация в области НРК хранится и передается в виде файлов стандарта DICONDE [4], являющегося расширенным набором тегов (далее суперсет), модифицирующий базовый словарь метаданных медицинского стандарта DICOM. Поскольку данные DICONDE хранятся в цветовой палитре, аналогичной снимкам медицинской радиографии, имеют большую часть одинаковых метаданных, также способ хранения, обработки и передачи информации, исследование применения ИНС для задачи детекции дефектов представляется актуальной и значимой областью для научного изучения.

Ранее проведенные авторские исследования фокусировались на анализе применения самых современных на момент изучения моделей YOLOv10 и наиболее точной к локальным

признакам YOLOv8 в задаче детекции дефектов на смежном с областью проводимых исследований наборе данных (далее датасет) металлических дефектов, поскольку в открытом доступе отсутствуют релевантные датасеты для исследуемой области. Исходя из выборки, состоявшей из 1000 изображений с преобладанием примеров 1-2 классов дефектов, получены были графики обучения, представленные на рисунке 1.

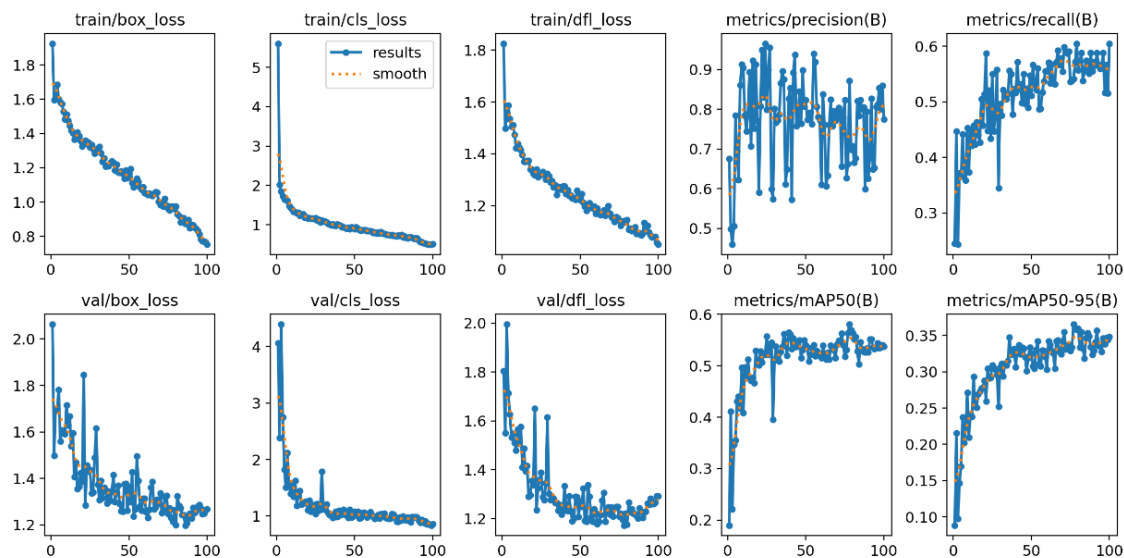


Рис. 1. График обучения YOLOv8s

Полученные результаты позволили сформировать вывод о существующих проблемах, связанных с обнаружением мелкогабаритных дефектов и ограниченной обобщающей способностью в отношении локальных признаков из-за некорректного датасета.

Проведя углубленное изучение имеющегося датасета и поиска дополнительных образцов для обучения ИНС, были выделены следующие ключевые факторы, способствующие объяснению ранее полученных результатов:

- 40-50% изображений в выборке содержат недостоверную информацию о размеченных дефектах;
- 15-20% изображений размечены с большой погрешностью ограничивающей рамки;
- 20-30% изображений содержат в метаданных неполные сведения о дефектах;
- 10% изображений лишены разметки присутствующих дефектов.

Примеры некорректных данных о разметке и их положение на изображении представлены на рисунке 2.

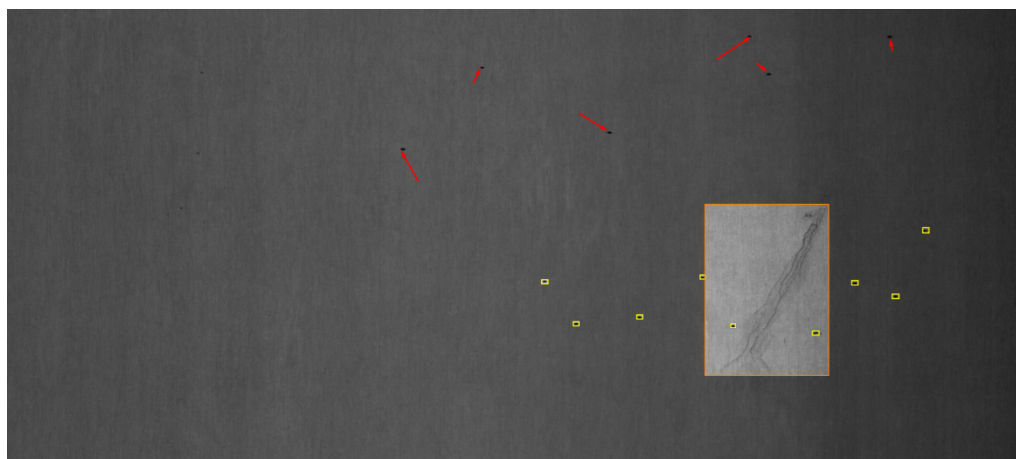


Рис. 2. Пример пропущенных дефектов

Приведенная иллюстрация наглядно демонстрирует актуальную проблему, существующую в открытых датасетах. Информация о дефектах типа «Включение», обозначенных с помощью желтой рамки, аннотировало либо единичные отдаленные объекты, либо группу дефектов в локальном пространстве. Подобная организация разметки несет отрицательный эффект, поскольку в пределах локального пространства могут находиться объекты, относящиеся к различным классам дефектов. Для достижения оптимальных результатов необходимо четко разграничивать объекты в процессе разметки, как показано на вышеприведенной иллюстрации. Кроме того, в данных разметки отсутствует информация о дефектах, обозначенных красной стрелкой, которые также требуют ручного аннотирования. Идентифицированные проблемы являются актуальными как для старого, так и для нового датасета, что свидетельствует о наличии недостатков в процессе обучения, обуславливающиеся наличием некорректной информации, что негативно сказывается на качестве обобщения признаков дефекта относительно элементов заднего фона. Таким образом, для повышения уровня уверенности модели необходимо устранение или минимизация доли подобных неточностей в данных.

Для осуществления дальнейшего исследования, была произведена самостоятельная переразметка данных, направленная на минимизации некорректных примеров. Кроме того, в сравнительную оценку эффективности моделей была добавлена новейшая версия YOLOv11[5], основанной на YOLOv8[6], заменяющая одну операцию свертки большим ядром (C2F) на 2 свертки малым (C3k2), а также добавляющая новый механизм частичного пространственного внимания (C2PSA) [7]. Текущий датасет обогащенный механизма аугментации, включает 6000 однородных изображений, приближенных к оптимальному балансу по количеству экземпляров. Обучение проводилось в 50 и 100 эпох для каждой модели. С целью устранения влияния случайности, обусловленного начальным распределением весов, каждое обучение проводилось не менее пяти раз. Распределение текущего датасета и графиков обучения моделей в сравнении с предыдущим результатами представлены на рисунках 3-6.

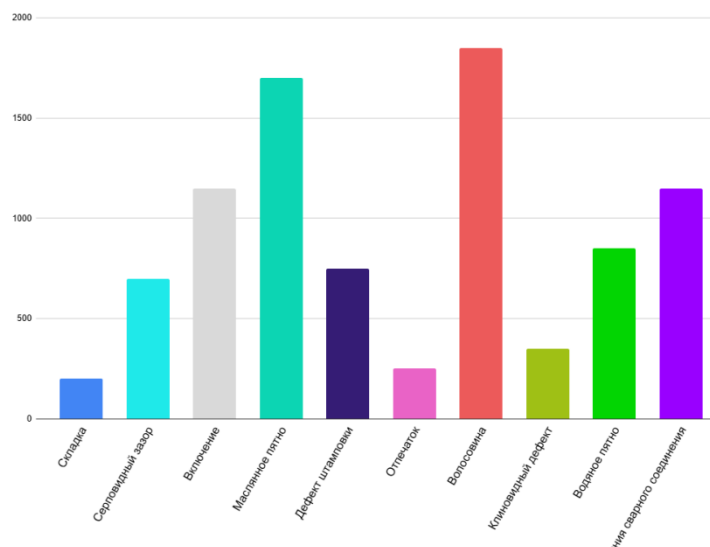


Рис. 3. Диаграмма количества экземпляров

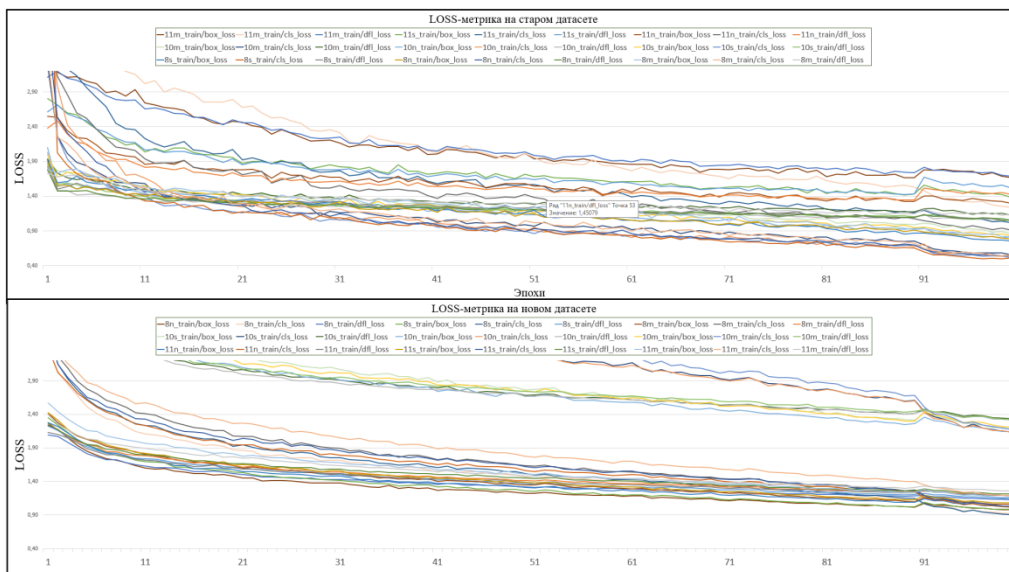


Рис. 4. Сравнительные графики LOSS-метрик на старом и новом датасете

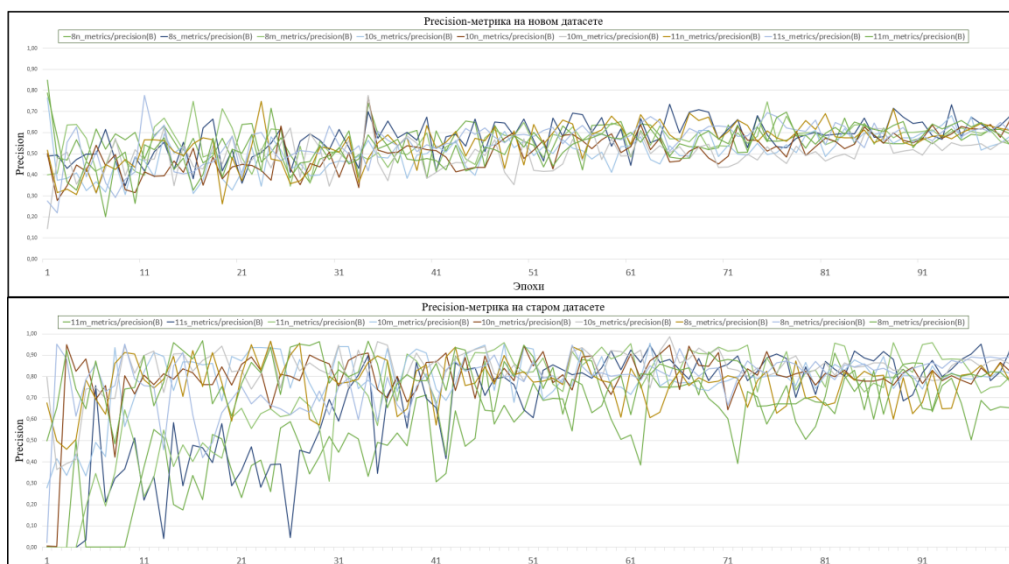


Рис. 5. Сравнительные графики Precision-метрик на старом и новом датасете



Рис. 6. Сравнительный графики Recall-метрики на старом и новом датасете

Приведенные иллюстрации наглядно демонстрируют наличие серьезных проблем с датасетом в процессе обучения. Вне зависимости от используемой модификации и глубины модели, при использовании старого датасета, наблюдаются явная проблема наличия взрывных градиентов и высокой доли ошибочных показателей в процессе обучения. Модификация данных о разметке и дополнение датасета привели к двукратному снижению среднего показателя неопределенности, повышению стабильности процесса обучения на всем временном промежутке и снижению величины ошибки на 17%. Базовые модели YOLOv8 и YOLOv11 модификации Small демонстрируют наилучшие показатели стабильности и качества обучения. Итоговый показатель уверенности моделей по всем классам составил 68%. Основные проблемы, по-прежнему, наблюдаются с детекцией малых и слабоконтрастных объектов, согласно полученной матрице ошибок, представленной на рисунке 7. Большинство слабо различимых дефектов, относительно, часто определяется как «фон». Данная проблема объясняется отсутствием нормализации цветового баланса изображений, наличия большего числа экземпляров, захватывающих посторонние объекты в ограничивающую рамку, а также наличия архитектурных проблем с выделением локальных признаков.

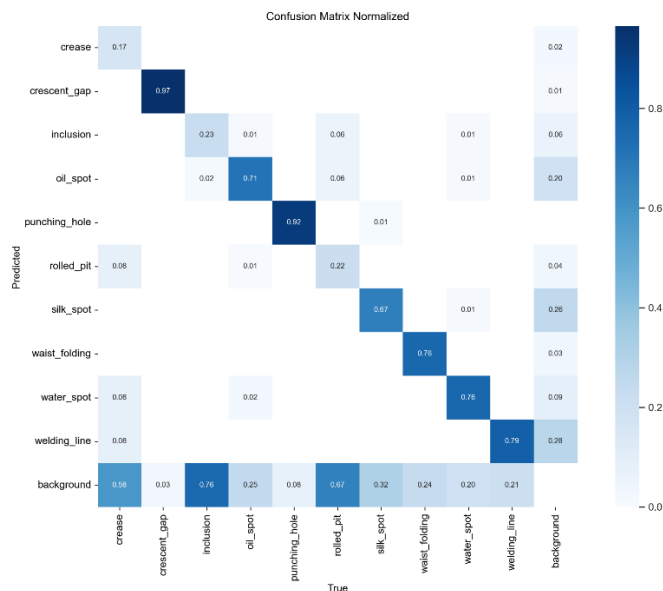


Рис. 7. Матрица ошибок детекции малых и слабоконтрастных объектов

Таким образом, следует заключить, что для достижения оптимального уровня уверенности модели и создания высокоточного инструмента для систем поддержки принятия решений, критически важным условием формирования выборки является тщательная маркировка всех дефектов на изображении. В процессе этой маркировки необходимо стремиться к максимальному соответствию реальным ограничивающим рамкам объектов. Дополнительным этапом отбора является валидация с привлечением экспертной группы для проверки данных на предмет несоответствия обнаруженных дефектов изображению или координатам.

В последующих исследованиях будет осуществлен анализ влияния точечной разметки в формате «полигон» на качество обучения ИНС при решении задач НРК. Также особое внимание будет уделено модификации базовой архитектуры с целью увеличения обобщающих способностей по отношению к локальным признакам и применению метаданных формата DICONDE в качестве дополнительного контекстного параметра, способствующего оптимизации процесса обучения ИНС.

Библиографический список

1. Агошков, А. И. Человеческий фактор в системе обеспечения устойчивого развития строительных организаций / А. И. Агошков, П. А. Курочкин // Поведенческие теории и практика российской науки : Сборник научных статей по итогам международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 26–27 февраля

2021 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный экономический университет, 2021. – С. 141-146.

2. Рынок нейронных сетей глубокого обучения (DNN) в Азиатско-Тихоокеанском регионе – тенденции отрасли и прогноз до 2028 года / URL: <https://www.databridgemarketresearch.com/ru/reports/asia-pacific-deep-learning-neural-networks-dnns-market?ysclid=m74ruoembe388575325>

3. Gupta M. et al. Advances in applications of Non-Destructive Testing (NDT): A review //Advances in Materials and Processing Technologies. – 2022. – Т. 8. – №. 2. – С. 2286-2307.

4. DICONDE / URL: <https://encyclopedia.pub/entry/28374>

5. Khanam R., Hussain M. Yolov11: An overview of the key architectural enhancements //arXiv preprint arXiv:2410.17725. – 2024.

6. Sohan M. et al. A review on yolov8 and its advancements //International Conference on Data Intelligence and Cognitive Informatics. – Springer, Singapore, 2024. – С. 529-545.

7. Satya Mallick. Yolo- learnopencv. <https://learnopencv.com/yolo11/>, 2024.

УДК 004.932; ГРНТИ 28.23.15

КОМБИНИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ И ЧАСТОТНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ СПЕКЛ-ШУМА ИЗОБРАЖЕНИЙ

В.Т. Чинь

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, vantoan.vkhk92@gmail.com*

Аннотация. В работе рассматривается сравнение различных комбинаций пространственных и частотных фильтров для подавления спекл-шума изображений различных классов. Представлены основные характеристики, преимущества и недостатки популярных пространственных и частотных фильтров, используемых для обработки зашумленных изображений. Рассматриваются четыре комбинации фильтров, сформированных на основе усредняющего и медианного фильтров и фильтров, построенных с помощью вейвлет-преобразования. Результаты машинных экспериментов показали преимущество вейвлет-медианного фильтра по сравнению с другими комбинациями фильтров по критериям пикового отношения сигнал-шум (ПОСШ) и индекса структурного сходства (SSIM).

Ключевые слова: спекл-шум, пространственный фильтр, частотный фильтр, усредняющий фильтр, медианный фильтр, вейвлет-фильтрация, комбинированная фильтрация.

COMBINING SPATIAL AND FREQUENCY FILTERING TO REDUCE SPECKLE NOISE IN IMAGES

V.T. Trinh

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, vantoan.vkhk92@gmail.com*

Abstract. The paper considers a comparison of various combinations of spatial and frequency filters for suppressing speckle noise of images belonging to different types. The main characteristics, advantages and disadvantages of popular spatial and frequency filters used for noisy image processing are presented. Four combinations of filters created by applying the average and median filters and the wavelet-based filters are considered. The results of machine experiments have shown the advantage of the wavelet median filter compared to other filter combinations according to the criteria of peak signal-to-noise ratio (PSNR) and structural similarity index (SSIM).

Keywords: speckle noise, spatial filter, frequency filter, mean filter, median filter, wavelet filter, combined filtering.

В изображениях, полученных с помощью радаров с синтезированной апертурой (РСА), ультразвуковых, лазерных и других систем, использующих когерентные источники излучения, неизбежно присутствует спекл-шум. Данный вид мультипликативного шума оказывает значительное негативное влияние на качество изображений, препятствуя их эффективному анализу и интерпретации. Пространственные и частотные методы подавления спекл-шума, применяемые по отдельности, имеют известные ограничения. Это обуславлива-

ет необходимость разработки комбинированных подходов, интегрирующих пространственные и частотные фильтры для взаимодополняющего использования их преимуществ и компенсации недостатков при обработке изображений, подверженных воздействию спекл-шума.

Спекл-шум и его влияние на качество изображений

Спекл-шум, имеющий мультипликативный характер, возникает в изображениях, полученных с использованием когерентных источников излучения, например, в радиолокационных, ультразвуковых и лазерных системах [1]. Спекл-шум обусловлен интерференцией когерентных волн, отраженных от поверхностей с микронеровностями. Данный эффект приводит к формированию случайных вариаций интенсивности пикселей, что проявляется в виде светлых пятен на изображениях, размер которых зависит от текстуры в формируемых изображениях.

Появление спекл-шума в изображениях приводит к следующим проблемам.

Во-первых, спекл создает затененные и искаженные области в изображении, которые могут затруднять точную интерпретацию данных. Это критично, например, в медицинской визуализации, где врачи полагаются на точность изображений для диагностики заболеваний. При наличии интенсивного, или сильно-развитого (*full-developed*) спекл-шума трудно различать такие структуры, как опухоли или участки воспаления.

Во-вторых, наличие спекл-шума может приводить к снижению точности и надежности алгоритмов автоматического анализа изображений, например, в системах технического зрения, так как большинство подобных алгоритмов основано на распознавании четко выраженных и дифференцируемых структурных элементов. Из-за случайного характера шума алгоритмы могут давать ложные результаты, что в целом снижает надежность систем автоматического управления.

Таким образом, явление спекл-шума представляет собой значительную проблему, требующую внимания в процессах визуализации и анализа изображений.

Спекл-шум может быть математически смоделирован как результат произведения исходного (неискаженного) изображения на случайную шумовую переменную. Тогда, в соответствии с данной моделью, зашумленное изображение Y выражается следующим образом:

$$Y = XZ, \quad (1)$$

где X – неискаженное изображение, а Z – спекл-шум с экспоненциальным распределением и единичным средним [1].

Сегодня разработано обширное множество методов и алгоритмов, направленных на подавление спекл-шума. Все известные решения можно условно поделить на три группы: пространственная фильтрация, частотная фильтрация и обработка с помощью нейронных сетей. Данная работа ограничивается рассмотрением и анализом первых двух подходов, поскольку автор считает, что применение нейронных сетей, например, сверточных (*convolution neural network*), не всегда дает надежные, то есть «устойчивые в среднем», результаты.

Пространственная и частотная фильтрация спекл-шума изображений

Пространственные методы фильтрации работают непосредственно с пикселями изображения, используя информацию из соседних областей. Они относительно просты в реализации, но могут размывать резкие границы объектов. «Классические» пространственные фильтры, используемые для шумоподавления, включают:

- *усредняющий (сглаживающий) фильтр*: заменяет значение каждого пикселя на среднее значение в окрестности. К сожалению, этот относительно легко реализуемый подход приводит к значительному размытию изображения [2, 3];

- *медианный фильтр*: заменяет значение каждого пикселя на медиану значений в окрестности. Считается эффективным для подавления импульсного шума, но может размывать края объектов [2, 4];

- *фильтр Гаусса*: принцип обработки аналогичен принципу обработки усредняющего фильтра, но использует взвешенное среднее, где центральные пиксели имеют бóльший вес. Размытие границ объектов на изображении встречается гораздо меньше по сравнению с усредняющим фильтром [2].

Частотные методы фильтрации, как принято считать, лучше сохраняют детали изображения, чем пространственные методы. «Классические» частотные фильтры, используемые для шумоподавления, включают:

- *фильтр на основе преобразования Фурье*: преобразование Фурье позволяет анализировать спектр частот изображения и удалять частоты, соответствующие спекл-шуму. Основной недостаток такого подхода в том, что сложно эффективно отделить шум от полезной информации [2];

- *вейвлет-фильтрация*: разложение изображения с помощью вейвлет-преобразования позволяет обрабатывать низкочастотные (структурные) и высокочастотные (детализированные) компоненты по отдельности. Высокочастотные компоненты изображения (детали), где спекл-шум значительно проявляется, модифицируются на основе пороговой обработки вейвлет-коэффициентов (например, *hard-* или *soft-thresholding*) [2, 5].

Комбинирование пространственной и частотной фильтрации

Комбинирование пространственной и частотной фильтрации основано на последовательном применении фильтров. На первом этапе изображение подвергается пространственной фильтрации для первичного снижения уровня шума. На втором этапе осуществляется частотная фильтрация, позволяющая выполнить более точную настройку и подавление оставшихся высокочастотных компонентов шума, не устраненных на первом этапе. Альтернативным подходом является обратная последовательность: сначала применяются частотные фильтры для подавления высокочастотного шума, а затем пространственные фильтры для устранения артефактов, возникающих в результате частотной фильтрации.

Методология реализации и результаты эксперимента

Комбинирование пространственной и частотной фильтрации может быть реализовано в различных последовательностях, эффективность которых зависит от конкретного выбора методов фильтрации. В данном исследовании оценена эффективность четырех комбинированных подходов. Пространственная фильтрация осуществлялась с использованием усредняющего и медианного фильтров, характеризующихся низкими вычислительными затратами и высокой скоростью обработки. В качестве частотного фильтра был использован вейвлет-фильтр, продемонстрировавший более высокую эффективность по сравнению с фильтром Фурье [1]. Экспериментальная оценка была выполнена для всех четырех различных комбинационных подходов:

- 1) вейвлет-фильтр + усредняющий фильтр: W-M.
- 2) вейвлет-фильтр + медианный фильтр: W-MD.
- 3) усредняющий фильтр + вейвлет-фильтр M-W.
- 4) медианный фильтр + вейвлет-фильтр MD-W.

Условия проведения эксперимента описаны в предыдущей работе [1]. Также для оценивания эффективности каждого из подходов применились следующие критерии: среднеквадратическая ошибка оценивания оригинала (СКО), пиковое отношение сигнал-шум (ПОСШ) и индекс структурного сходства (SSIM). Результаты эксперимента представлены в таблице 1 и на рисунках 1 и 2.

Таблица 1. Результаты экспериментов

Дисперсия шума	СКО							
	Зашумлённое изображение	Восстановленное изображение						
		Wavelet	Mean	Median	M-W	MD- W	W-M	W-MD
0,04	770	191	174	274	160	200	210	191
0,05	953	203	196	327	175	232	221	202
0,06	1135	215	220	381	191	260	233	214
0,07	1312	226	242	432	204	287	242	224
0,08	1488	237	265	488	219	319	252	234
0,09	1659	247	287	538	235	341	262	244
0,10	1830	257	311	591	250	372	271	253
0,11	1999	266	333	644	264	401	280	262
0,12	2162	276	355	693	278	427	289	271
0,04	19,44	26,24	26,01	23,96	26,54	25,46	25,77	26,35
0,05	18,50	25,94	25,46	23,19	26,13	24,78	25,52	26,05
0,06	17,74	25,66	24,94	22,51	25,72	24,25	25,27	25,75
0,07	17,10	25,44	24,51	21,95	25,41	23,80	25,08	25,53
0,08	16,55	25,22	24,11	21,43	25,09	23,33	24,91	25,33
0,09	16,07	25,03	23,74	20,99	24,77	23,01	24,73	25,13
0,10	15,63	24,86	23,40	20,58	24,50	22,62	24,58	24,96
0,11	15,24	24,69	23,09	20,21	24,24	22,29	24,42	24,78
0,12	14,90	24,54	22,81	19,89	24,01	22,00	24,29	24,64
0,04	0,32	0,62	0,60	0,47	0,64	0,56	0,62	0,63
0,05	0,29	0,61	0,57	0,44	0,62	0,53	0,61	0,62
0,06	0,26	0,60	0,54	0,41	0,60	0,50	0,60	0,61
0,07	0,24	0,60	0,52	0,39	0,58	0,48	0,59	0,60
0,08	0,22	0,59	0,50	0,36	0,57	0,46	0,59	0,60
0,09	0,21	0,58	0,48	0,35	0,55	0,45	0,58	0,59
0,10	0,20	0,58	0,46	0,33	0,54	0,43	0,58	0,59
0,11	0,19	0,57	0,45	0,32	0,53	0,42	0,57	0,58
0,12	0,18	0,57	0,43	0,31	0,52	0,41	0,57	0,58

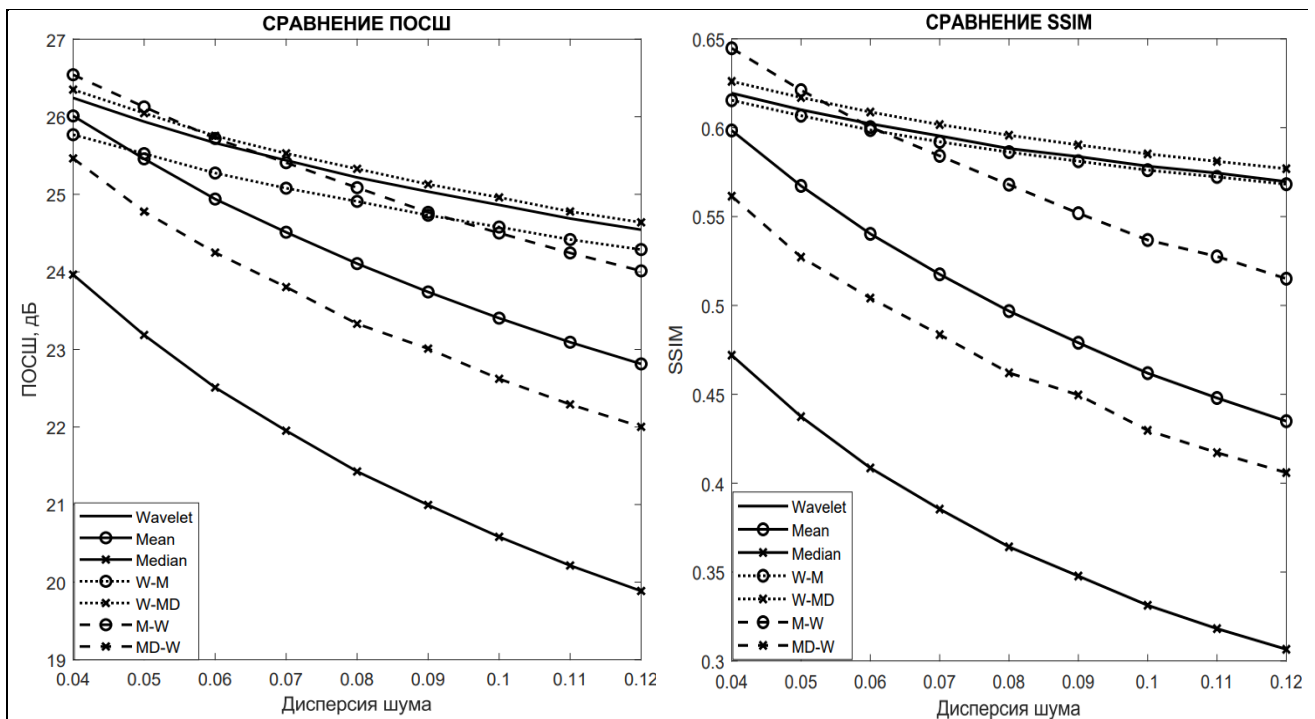


Рис. 1. Сравнение значений ПОСШ и SSIM

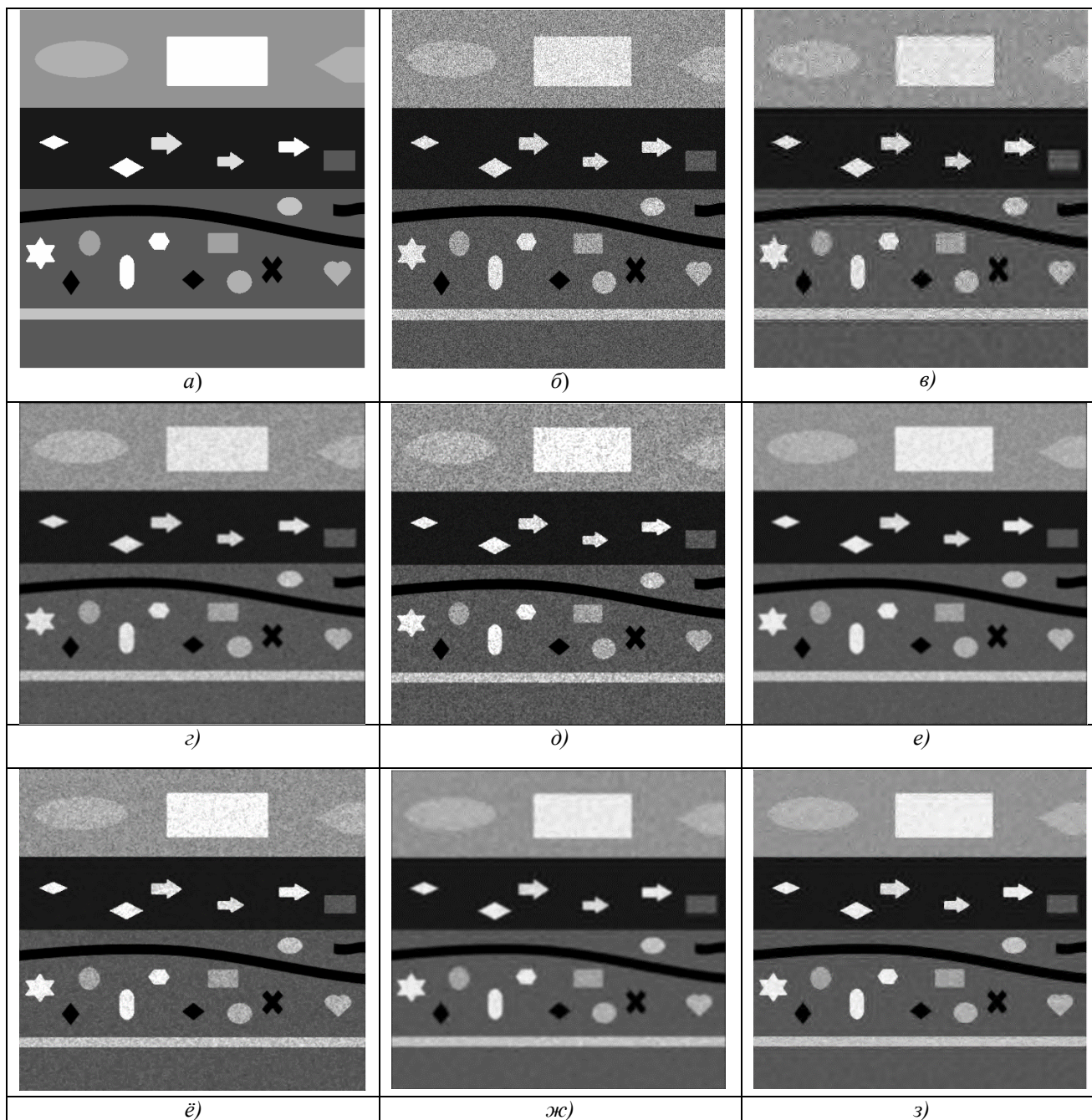


Рис. 2. Результаты обработки изображения: (а) – исходное неискаженное изображение; (б) – зашумленное изображение (дисперсия спекл-шума $\sigma^2 = 0,06$); (в) – изображение, восстановленное с помощью вейвлет-фильтра; (г) – изображение, восстановленное с помощью усредняющего фильтра; (д) – изображение, восстановленное с помощью медианного фильтра; (е) – изображение, восстановленное комбинационным методом M-W; (е') – изображение, восстановленное комбинационным методом MD-W; (ж) – изображение, восстановленное комбинационным методом W-M; (з) – изображение, восстановленное комбинационным методом W-MD.

Обсуждение результатов

Анализ результатов эксперимента продемонстрировал, что применение комбинированных фильтров обеспечивает более высокую эффективность подавления спекл-шума по сравнению с использованием только одного фильтра. Данные, представленные в Таблице 1 и на рис. 1, свидетельствуют о том, что последовательное применение частотного фильтра с последующим пространственным фильтром является результативным подходом. Это обусловлено тем, что частотный фильтр эффективно подавляет высокочастотные компоненты шума, в то время

как пространственный фильтр, применяемый на следующем этапе, предназначен для минимизации артефактов, индуцированных частотной обработкой, и повышения однородности фона изображения. Применение комбинации фильтров в обратной последовательности не является таким результативным, как в первом случае, поскольку предварительное использование пространственного фильтра может привести к снижению отношения сигнал-шум, что, в свою очередь, ухудшает эффективность частотной фильтрации. Результаты экспериментальных исследований показывают, что комбинированный фильтр вида W-MD (вейвлет-медианный фильтр) демонстрирует наилучшую эффективность среди всех рассмотренных подходов. Это обусловлено тем, что медианный фильтр, в отличие от усредняющего, обладает улучшенной способностью сохранения контуров, как это наглядно показано на рисунке 2.

Заключение

В данной работе представлены результаты исследования, посвященного сравнению эффективности комбинирования пространственной и частотной фильтрации для подавления спекл-шума изображений. Результаты исследования показывают, что комбинированное использование вейвлет-медианного фильтра обеспечивает относительно высокую эффективность подавления спекл-шума.

Библиографический список

1. Bekhtin, Yu.S., Trinh V.T., Wavelet-based filtering of noisy images using their approximations in subbands of details // Proceedings of the 34th Int. Conf. on Computer Graphics and Machine Vision GraphiCon 2024, pp. 525-531.
2. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера.2005.-1072 с.
3. Rajesh Kumar N., Uday Kumar J., A spatial mean and median filter for noise removal in digital images. М.: Техносфера.2005.-1072 с.
4. Maheswari D., "Noise removal in compound image using median filter". International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering Vol. 4, Issue 1, 2015, pp. 246-253.
5. Malla, S. Wavelets in signal processing. Moscow: Mir, 2005.

УДК 004.932; ГРНТИ 28.23.15

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ СОВМЕЩЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ БИЛИНЕЙНОМ ПРЕОБРАЗОВАНИИ

П.В. Бабаян, Е.С. Жгутова

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, kozhina.e.s@rsreu.ru*

Аннотация. Работа посвящена исследованию билинейного преобразования, а также оценке его параметров на изображении. В работе представлена математическая модель преобразования и результаты проведенных экспериментальных исследований. Экспериментальные исследования проведены для двух вариантов выбора особых точек с целью выявления зависимости точности оценки параметров от расположения точек. В работе представлены корреляционные матрицы для обоих вариантов выбора точек, а также вычислены значения дисперсий для каждой точке изображения. Экспериментальные исследования подтвердили сделанные ранее выводы на основе математической модели алгоритма оценивания параметров преобразования. Полученные результаты можно применить при разработке алгоритмов выделения и обнаружения объектов с целью компенсации геометрических искажений, в процессе стабилизации изображения и др.

Ключевые слова: билинейное преобразование, корреляционная матрица, геометрические преобразования, оценка преобразований, совмещение изображений.

AN ALGORITHM FOR ESTIMATING THE ACCURACY OF ALIGNMENT IMAGES WITH BILINEAR TRANSFORMATION

P.V. Babayan, E.S. Zhgutova

Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, kozhina.e.s@rsreu.ru

The summary. The paper is devoted to the study of the bilinear transformation, as well as the evaluation of its parameters in the image. The paper presents a mathematical model of the transformation and the results of experimental studies. Experimental studies have been conducted for two variants of the selection of singular points in order to identify the dependence of the accuracy of parameter estimation on the location of the points. The paper presents correlation matrices for both point selection options, and calculates the variance values for each point in the image. Experimental studies have confirmed the conclusions reached earlier based on the mathematical model of the algorithm for estimating transformation parameters. The results obtained can be applied in the development of algorithms for selecting and detecting objects in order to compensate for geometric distortions, in the process of image stabilization, etc.

Keywords: bilinear transformation, correlation matrix, geometric transformations, evaluation of transformations, image alignment.

Введение

В наше время невозможно представить жизнь без систем технического зрения. Они применяются повсюду: в медицине, в промышленности и производстве, в космосе, в сельском хозяйстве и во многих других сферах жизнедеятельности [1]. В связи с этим разработка и усовершенствование алгоритмов обработки изображений – очень важная и актуальная задача. Одним из этапов обработки изображений является оценка геометрических преобразований [2]. Не всегда формируемые датчиком изображения могут быть сняты с одного ракурса, если говорить про снимки. Кроме того, многие изображения, полученные с подвижных носителей, вследствие их движения также содержат какие-либо геометрические искажения [3]. Оценивать геометрические преобразования необходимо для того, чтобы попытаться вернуть текущее изображение к исходному для дальнейших сравнений или обработки.

Алгоритмов оценки геометрических преобразований существует множество, каждый обладает как преимуществами, так и недостатками. Можно выделить следующие группы таких алгоритмов:

- корреляционные;
- структурные;
- методы оптического потока;
- алгоритмы машинного обучения и искусственные нейронные сети.

Работа корреляционных методов [4] заключается в поиске заранее известного эталонного объекта по всему изображению. Для этого могут использоваться разные алгоритмы (разностные [5], корреляционно-экстремальные [6] и др.) и все они обладают достаточно высокой вычислительной сложностью. Кроме этого разница между эталонным изображением и текущим с течением времени возрастает.

Структурные алгоритмы [7, 8] основаны на выборе какого-либо объекта на изображении (участки изображений, особые точки, отрезки линий, окружностей и пр.) и оценке его положения. Таким образом используется более компактное описание изображения, поэтому затраты на вычислительные операции гораздо меньше, чем в других алгоритмах.

Методы оптического потока позволяют для каждого изображения оценить геометрические изменения относительно предыдущего кадра [9]. По сути оптический поток – это поле скоростей (для каждой точки изображения определяется такой сдвиг, чтобы исходная точка соответствовала точке на втором изображении). Среди методов оптического потока выде-

ляют: метод Лукаса-Канаде, метод Horn-Schunck, метод Buxton-Buxton и др [9]. Вычислительная сложность данных алгоритмов также достаточно высока.

Алгоритмы машинного обучения [10] и искусственные нейронные сети [11] также можно использовать для решения поставленной задачи. Данные алгоритмы обладают высокой вычислительной сложностью, также требуют качественного и сложного подбора обучающей базы изображений, но при этом выдают гораздо более точный результат по сравнению с остальными методами.

В настоящее время какого-то одного универсального алгоритма, подходящего под любую задачу, не существует. Именно поэтому выбирать подход необходимо конкретно для своих условий применения. Среди представленных методов наиболее подходящими являются структурные алгоритмы. Отказ от применения нейронных сетей и машинного обучения обусловлен отсутствием обучающей базы изображений. Среди всех структурных методов наименее вычислительно затратным и при этом достаточно точным является алгоритм на основе особых точек [8].

Оценка точности совмещения изображений при билинейном преобразовании

Ранее в работах были рассмотрены преобразования: смещения, поворота, масштаба, масштаба и смещения, масштаба и поворота, евклидовы, подобия, аффинные [12-14]. В данной работе предлагается рассмотреть билинейное преобразование [15]. Данное преобразование разбивает изображение на части и в каждой части применяет различные линейные преобразования со своими заданными параметрами.

Для описания билинейного преобразования воспользуемся выражением:

$$\begin{aligned} x'_i &= a_1x_i + a_2y_i + a_3x_iy_i + a_4; \\ y'_i &= b_1x_i + b_2y_i + b_3x_iy_i + b_4, \end{aligned} \quad (1)$$

где x_i и y_i – координаты точек исходного изображения,

x'_i и y'_i – координаты точек текущего изображения,

$a_1, a_2, a_3, a_4, b_1, b_2, b_3, b_4$ – коэффициенты преобразования.

Вектор параметров билинейного преобразования запишем в виде:

$$\mathbf{U} = [a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4]'. \quad (2)$$

Для получения значений оценок геометрических преобразований необходимо решить следующее уравнение:

$$\mathbf{H}\mathbf{U} = \mathbf{Z}, \quad (3)$$

где \mathbf{Z} – вектор координат текущего изображения,

$$\text{матрица преобразований } \mathbf{H} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & x_1y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & x_1y_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & x_ny_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_n & y_n & x_ny_n & 1 \end{bmatrix},$$

где n – количество выбранных точек. Для того, чтобы решить уравнение (1) требуется выбрать минимум 4 точки.

Получить оценку параметров преобразования можно, вычислив матрицу $\mathbf{H}^T\mathbf{H}$ [12-14]:

$$\mathbf{H}^T \mathbf{H} = \begin{bmatrix} T & \vdots & S \\ \dots & \vdots & \dots \\ S & \vdots & T \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $T = \begin{bmatrix} \sum x_n^2 & \sum x_n y_n & \sum x_n^2 y_n & \sum x_n \\ \sum x_n y_n & \sum y_n^2 & \sum x_n y_n^2 & \sum y_n \\ \sum x_n^2 y_n & \sum x_n y_n^2 & \sum x_n^2 y_n^2 & \sum x_n y_n \\ \sum x_n & \sum y_n & \sum x_n y_n & N \end{bmatrix}$, S – матрица нулей размером 4x4.

Чтобы найти параметры вектора \mathbf{U} , необходимо использовать выражение:

$$\hat{\mathbf{U}} = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \cdot \mathbf{H}^T \cdot \mathbf{Z}. \quad (5)$$

Найти корреляционную матрицу параметров билинейного преобразования \mathbf{K}_U можно в соответствии с выражением [12-14]:

$$\mathbf{K}_U = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \cdot \sigma_Z^2 = \begin{bmatrix} T & \vdots & S \\ \dots & \vdots & \dots \\ S & \vdots & T \end{bmatrix}^{-1} \cdot \sigma_Z^2, \quad (6)$$

где σ_Z – дисперсия оценки координат особых точек.

На основе корреляционной матрицы \mathbf{K}_U (6) необходимо найти корреляционную матрицу для координат x'_i и y'_i . Воспользуемся матричным представлением билинейного преобразования (1):

$$\mathbf{V} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{U}, \text{ где } \mathbf{W} = \begin{bmatrix} x & y & xy & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x & y & xy & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{V} = \begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Тогда ковариационную матрицу вектора \mathbf{V} можно найти по формуле

$$\mathbf{K}_V = \mathbf{W} \mathbf{K}_U \mathbf{W}^T. \quad (8)$$

Для каждой точки изображения матрица \mathbf{K}_V имеет размерность 2x2 и содержит по главной диагонали значения дисперсий ошибок совмещения по горизонтали и вертикали (D_x и D_y , соответственно), а по побочной – корреляции между этими ошибками:

$$\mathbf{K}_V = \begin{bmatrix} D_x & K_{xy} \\ K_{xy} & D_y \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Значения матрицы \mathbf{K}_V характеризуют искомые ошибки совмещения изображений.

Экспериментальные исследования алгоритма

О точности оценки параметров можно судить по элементам матрицы \mathbf{K}_U . Чем больше эти значения, тем менее точно оцениваются параметры преобразования. Предположительно, больше эти значения будут в том случае, когда координаты точек расположены в какой-либо одной зоне изображения (центр, углы и т.д.), точность будет заметно ниже. Для увеличения точности необходимо выбирать точки по всему изображению. Помимо этого количество точек также влияет на точность оценки: большее количество выбранных точек приведет к более точной оценке параметров преобразования. Для подтверждения сделанных ранее выводов необходимо провести экспериментальные исследования.

Экспериментальные исследования проводились как на отдельно взятых кадрах, так и на последовательностях изображений ТВ и ИК-диапазонов. Для сравнения особые точки были расположены только в центре изображения и разнесены равномерно по всей площади кадра. Расположение точек представлено на рисунке 1: а) – выбор точек возможен по всему изображению, б) – выбор точек ограничен центром изображения. Значение дисперсии σ_z принято равным 1, т.к. особое значение в проводимом экспериментальном исследовании оно не имеет.

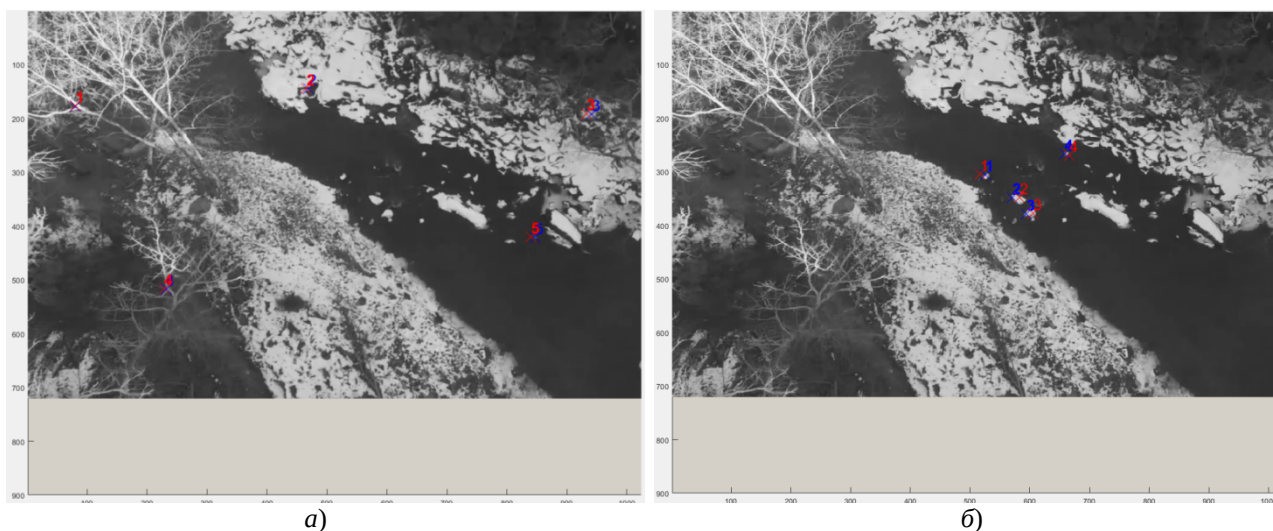


Рис. 1. Выбор точек на изображении: а) – выбор точек возможен по всей площади изображения, б) – выбор точек возможен только в центре изображения

Для каждого случая по формулам (6), (8), (9) были вычислены корреляционные матрицы в каждой точке изображения. Гистограммы дисперсий ошибок совмещения этих изображений D_x показаны на рисунке 2.

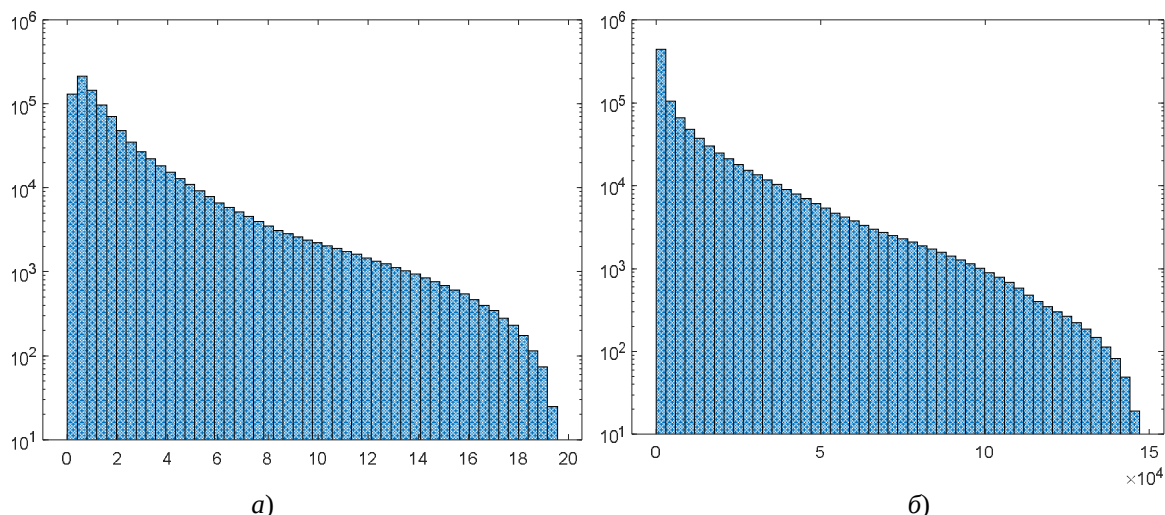


Рис. 2. Гистограммы дисперсий ошибок совмещения изображений: а) – выбор точек по всей площади изображения, б) – выбор точек только в центре изображения

Корреляционная матрица для первого варианта выбора точек:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1,0316 \cdot 10^{-5} & 1,2817 \cdot 10^{-5} & 3,0849 \cdot 10^{-8} & 0,0045 \\ 1,2817 \cdot 10^{-5} & 2,7849 \cdot 10^{-5} & 4,5875 \cdot 10^{-8} & 0,0079 \\ 3,0849 \cdot 10^{-8} & 4,5875 \cdot 10^{-8} & 1,1144 \cdot 10^{-10} & 1,2719 \cdot 10^{-5} \\ 0,0045 & 0,0079 & 1,2719 \cdot 10^{-5} & 2,9055 \end{bmatrix}.$$

Корреляционная матрица для второго варианта выбора точек:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0,1471 & 0,3054 & 5,0449 \cdot 10^{-4} & 89,7461 \\ 0,3054 & 0,6346 & 0,0010 & 186,3536 \\ 5,0449 \cdot 10^{-4} & 0,0010 & 1,7316 \cdot 10^{-6} & 0,3077 \\ 89,7461 & 186,3536 & 0,3077 & 5,4767 \cdot 10^4 \end{bmatrix}.$$

По гистограммам дисперсий ошибок совмещения изображений, представленным на рисунке 2, можно сделать следующий вывод: для первого случая значения дисперсий по всему изображению почти в 9 тысяч раз меньше, чем для второго случая. Это говорит о том, что при совмещении изображений наибольшая разница между совмещенными изображениями будет во втором случае. Параметры преобразования оценены менее точно в связи с тем, что из-за группировки точек в одной определенной зоне, в данном случае в центре изображения, не удастся выполнить достаточно точную оценку преобразований.

Представленные корреляционные матрицы своими значениями также подтверждают сделанные ранее выводы.

Заключение

Представленные в работе результаты направлены на повышение точности оценивания параметров геометрических преобразований. Конкретно в данной работе были рассмотрены билинейные преобразования, а также математические выражения для получения корреляционной матрицы. Выводы о точности оценивания преобразования, сделанные в соответствии с представленной математической моделью алгоритма, были подтверждены при проведении экспериментальных исследований. Даны практические рекомендации для выбора точек на изображении.

Библиографический список

1. Мисюров, М. Н. Упрощение производственного процесса за счет использования систем технического зрения / М. Н. Мисюров. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2016. – № 3 (107). – С. 151-153. – URL: <https://moluch.ru/archive/107/25537/> (дата обращения: 18.02.2025).
2. Ярышев С.Н., Рыжова В.А., Вольнский М.А. Системы технического зрения в задачах обнаружения, измерения, управления – СПб: Университет ИТМО, 2023 – 116 с.
3. Блохин Ю. В. Модель системы технического зрения дистанционно управляемых подвижных объектов // Информатика, телекоммуникации и управление. – 2010. – №. 6 (113). – С. 101-105.
4. Овчинников А. Ю., Корепанов С. Е. Автоматическое слежение за объектом с использованием корреляционного метода // Современные технологии в науке и образовании-СТНО-2020. – 2020. – С. 178-184.
5. G. D. Evangelidis, E. Z. Psarakis, «Parametric Image Alignment Using Enhanced Correlation Coefficient Maximization», in IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 30, no. 10, pp. 1858-1865, Oct. 2008, doi: 10.1109/TPAMI.2008.113.
6. He Z., Zhang Z., Jung C. Fast Fourier transform networks for object tracking based on correlation filter // IEEE Access. – 2018. – Т. 6. – С. 6594-6601.
7. Alpatov B.A., Strotov V.V. An estimation algorithm of the multispectral image geometric transformation parameters based on multiple reference area tracking // SPIE Defense, Security, and Sensing. – International Society for Optics and Photonics. – pp. 87130Q-87130Q-8. (2013)
8. Strotov V.V. Comparison of two structural algorithms for estimating parameters of geometric image transformations // Digital signal processing. – 2013. – №. 3. – С. 21-25.

9. Щербаков В. В., Гарганеев А. Г., Шакиров И. В. Алгоритм расчета оптического потока в задачах оценки параметров геометрических преобразований // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2012. – №. 2-1 (26). – С. 265-270.

10. Полетаева Н. Г. Классификация систем машинного обучения // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Физико-математические и технические науки. – 2020. – №. 1. – С. 5-22.

11. Созыкин А. В. Обзор методов обучения глубоких нейронных сетей // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика. – 2017. – Т. 6. – №. 3. – С. 28-59.

12. Babayan P. V., Kozhina (Zhgutova) E. S. Estimation of the Accuracy of Determining the Parameters of Affine Transformations // 2024 26th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA). – IEEE, 2024. – С. 1-5.

13. Babayan P., Kozhina (Zhgutova) E. Accuracy of Image Registration During Similarity Transformation // International Conference on Machine Vision and Augmented Intelligence. – Singapore : Springer Nature Singapore, 2023. – С. 323-330.

14. Babayan P. V., Kozhina (Zhgutova) E. S. A Study of the Automatic Object Extraction Algorithm on the Image Sequence Under Scaling Transformations // 2023 25th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA). – IEEE, 2023. – С. 1-4.

15. Floater M. S. The inverse of a rational bilinear mapping // Computer Aided Geometric Design. – 2015.

УДК 004.932, ГРНТИ 28.23.15

ОБНАРУЖЕНИЕ КЛУБНЕЙ КАРТОФЕЛЯ НА ФОНЕ ГРУНТА

Е.П. Мудров, А.В. Левитин

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

Аннотация. В работе рассматривается задача сегментации изображения, содержащего клубни картофеля на фоне грунта, с целью выделения элементов изображения, принадлежащих клубням. В качестве признаков классификации элементов использовались размытые цветовые каналы. Классификация элементов осуществлялась с помощью случайного леса (Random forest) и процедуры линейного дискриминантного анализа (LDA). Приводятся результаты экспериментального исследования, свидетельствующие об эффективности предложенных подходов.

Ключевые слова: сегментация изображений, классификация, линейный дискриминантный анализ, случайный лес, обнаружение клубней.

DETECTION OF POTATO TUBERS AGAINST THE BACKGROUND OF SOIL

E.P.Mudrov, A.V.Levitin

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F.Utkin,
Russian Federation, Ryazan, yegormudrov@mail.ru*

The summary. The paper considers the problem of segmentation of an image containing potato tubers against the background of the soil in order to isolate image elements belonging to the tubers. Blurred color channels were used as features for classifying elements. The elements were classified using a random forest and the linear discriminant analysis (LDA) procedure. The results of an experimental study are presented, indicating the effectiveness of the proposed approaches.

Keywords: image segmentation, classification, linear discriminant analysis, random forest, tuber detection.

Задача обнаружения клубней картофеля на фоне грунта возникла при разработке программно-алгоритмического обеспечения системы технического зрения (СТЗ) для интеллектуального картофелеуборочного комбайна. СТЗ должна осуществлять поэлементную бинарную сегментацию изображений, получаемых регистрирующей камерой, по правилу «клубень – не клубень» на основании обучающего набора размеченных изображений.

Ситуация осложняется тем, что клубни картофеля могут быть частично покрыты грунтом (рис.1) и по этой причине для отнесения элемента изображения к тому или иному классу необходимо анализировать изображение в некоторой окрестности классифицируемого элемента, формируя соответствующие нелокальные признаки элемента.

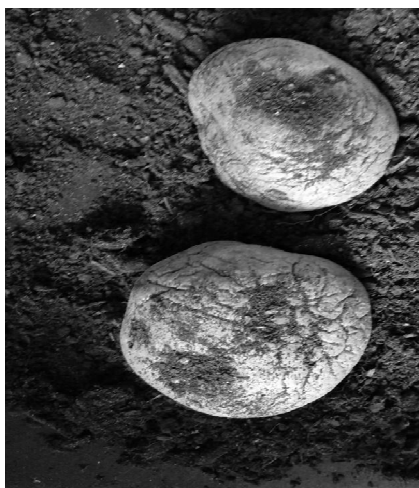


Рис. 1. Клубни картофеля на фоне грунта

Признаки элементов изображения

В качестве вектора признаков для ij -го элемента изображения использовался вектор $\mathbf{z}_{ij} \in R^3$, в котором k -ый компонент вычисляется по формуле

$$\mathbf{z}_{ij}^k = \sum_{n,m} a_{nm} q_{i+n,j+m}^k, \quad (1)$$

где q_{ij}^k – значение k -го цветового канала ij -го элемента;

a_{nm} – коэффициенты, подбираемые таким образом, чтобы значение признака \mathbf{z}_{ij}^k определялось значениями цветового канала в некоторой окрестности ij -го элемента, обеспечивая тем самым нелокальность многомерного признака \mathbf{z}_{ij} .

Линейное преобразование (1), размывая изображение, «скрывает» фрагменты грунта, находящиеся на клубнях.

Методы классификации элементов изображения

Классификация элементов изображения проводилась с помощью процедур линейного дискриминантного анализа (Linear Discriminant Analysis, LDA) [1] и случайного леса (Random forest, RF) [2].

LDA предполагает, что величины \mathbf{z}_{ij} имеют нормальное распределение с одинаковыми ковариационными матрицами для грунта и клубней. Введем обозначения: $x_{ij} \in T_0$ – элемент изображения x_{ij} расположен в области T_0 с грунтом; $x_{ij} \in T_1$ – элемент x_{ij} расположен в области T_1 с клубнем. Тогда, в соответствии с выше сделанными предположениями LDA, справедливо соотношение:

$$\ln p(x_{ij} \in T_k | \mathbf{z}_{ij}) = \mathbf{v}_k^T \mathbf{z}_{ij} + \eta_k + c, \quad (2)$$

где $p(x_{ij} \in T_k | \mathbf{z}_{ij})$ – оценка апостериорной вероятности того, что $x_{ij} \in T_k$; $\mathbf{v}_k = \Sigma^{-1} \mathbf{m}_k$;

$$\eta_k = -\frac{1}{2} \mathbf{m}_k^T \Sigma^{-1} \mathbf{m}_k + \ln p(x_{ij} \in T_k);$$

\mathbf{m}_k – выборочная оценка математического ожидания \mathbf{z}_{ij} при $x_{ij} \in T_k$;

Σ – выборочная оценка ковариационной матрицы \mathbf{z}_{ij} ;

$p(x_{ij} \in T_k)$ – оценка априорной вероятности того, что $x_{ij} \in T_k$;

c – нормирующая величина, обеспечивающая равенство $\sum_{k=0}^1 p(x_{ij} \in T_k | \mathbf{z}_{ij}) = 1$.

RF объединяет множество деревьев решений, чтобы улучшить точность и устойчивость модели. При этом используется бутстрэп-агрегирование (Bagging), когда каждое дерево обучается на случайной выборке данных с повторением. При каждом разделении узла дерева рассматривается случайное подмножество признаков. После обучения всех деревьев классификация выполняется путем голосования, в котором каждое дерево «голосует» за один из классов, и в итоге выбирается класс, получивший большинство голосов.

Экспериментальное исследование

Обучающее изображение размером 707×1000 и его разметка представлены на рисунке 2.

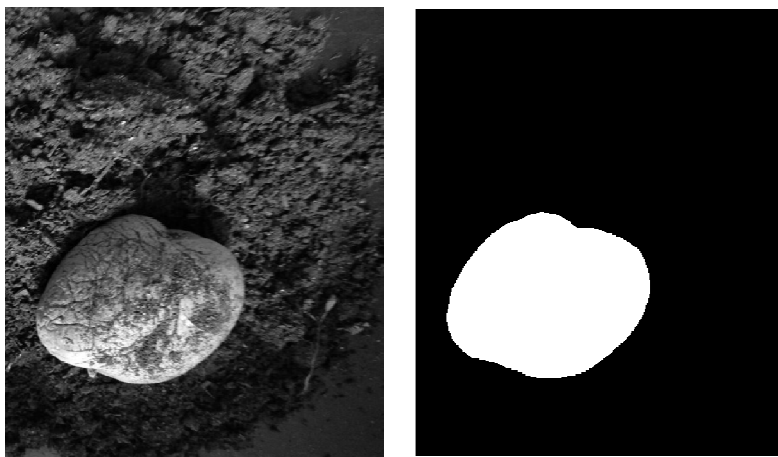


Рис. 2. Обучающее изображение и его разметка

Коэффициенты в составе соотношения (1) принимали значения

$$a_{nm} = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{n^2 + m^2}{2\sigma^2}\right), \quad (3)$$

где параметр σ , оптимальное значение которого подлежит экспериментальному определению, определяет глубину размытия изображения,

Рисунок 3 содержит диаграммы рассеяния и гистограммы значений цветовых каналов при $\sigma = 40$.

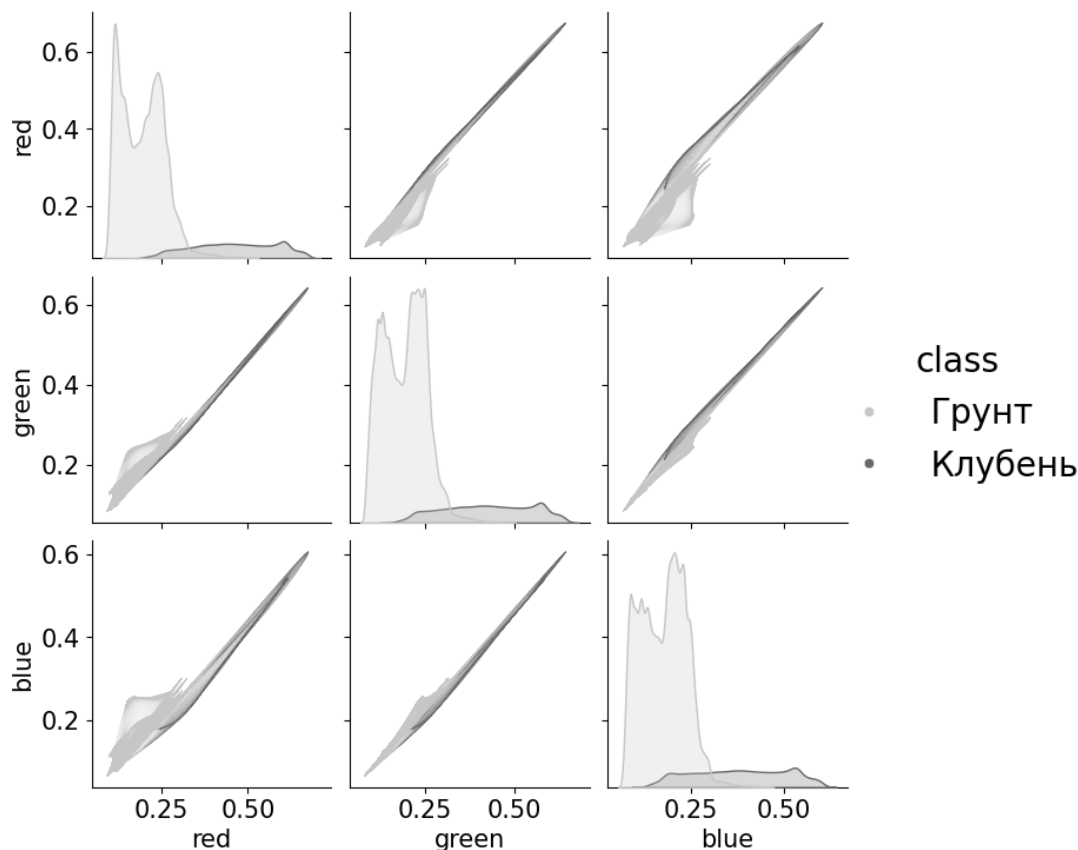


Рис. 3. Диаграммы рассеяния и гистограммы размытых цветовых каналов обучающего изображения при $\sigma = 40$

Для реализации процедур LDA и RF использовались классы LinearDiscriminantAnalysis и RandomForestClassifier python-библиотеки Scikit-learn. Основные параметры RandomForestClassifier принимали значения: `n_estimators = 50` (число деревьев); `max_depth = 10` (максимальная глубина деревьев).

В качестве тестового использовалось изображение размером 627×1000 , представленное на рисунке 1.

Показателями эффективности исследуемых методов являлись точность (`precision`) – доля элементов, принадлежащих клубням, среди всех элементов, признанных принадлежащими клубням, и полнота (`recall`) – доля элементов, признанных принадлежащими клубням, среди всех элементов, принадлежащих клубням.

На рисунке 4 показаны результаты сегментации тестового изображения при $\sigma = 29$. Оценки вероятностей принадлежности элемента к клубням получены с помощью метода `predict_proba()`. Значения характеристик классификации: `precision = 0.92`; `recall = 0.94`. Оставшиеся «дыры» в бинарных образах клубней могут быть легко убраны последующей морфологической коррекцией.

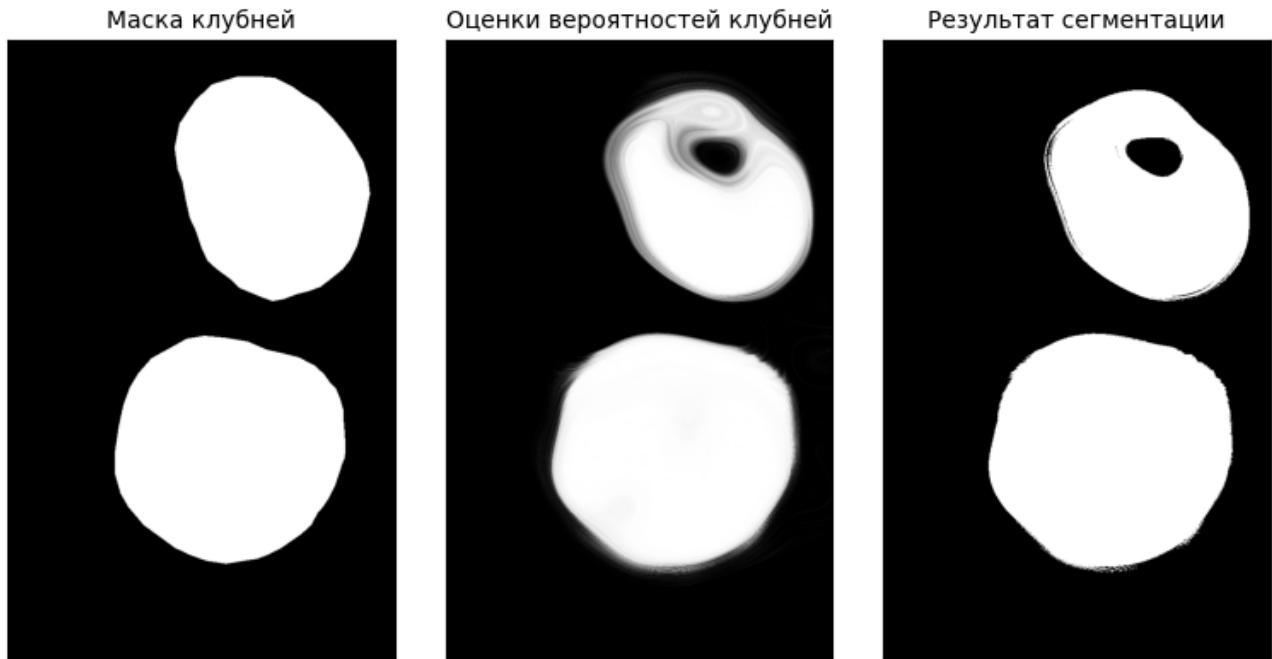


Рис. 4. Результат сегментации тестового изображения с помощью RF

На рисунке 5 представлены зависимости точности и полноты обнаружения элементов, принадлежащих клубням, от значения параметра σ для методов LDA и RF.

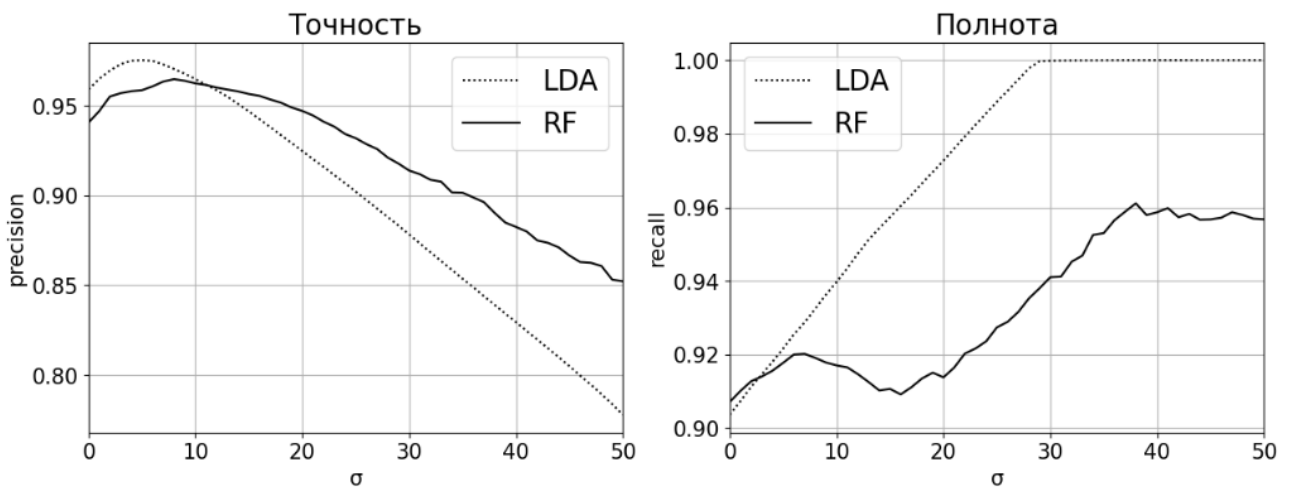


Рис.5. Зависимости характеристик обнаружения клубней от параметра глубины размытия σ

На рисунке 6 показаны кривые точность-полнота и зависимости площади под кривыми точность-полнота от параметра σ .

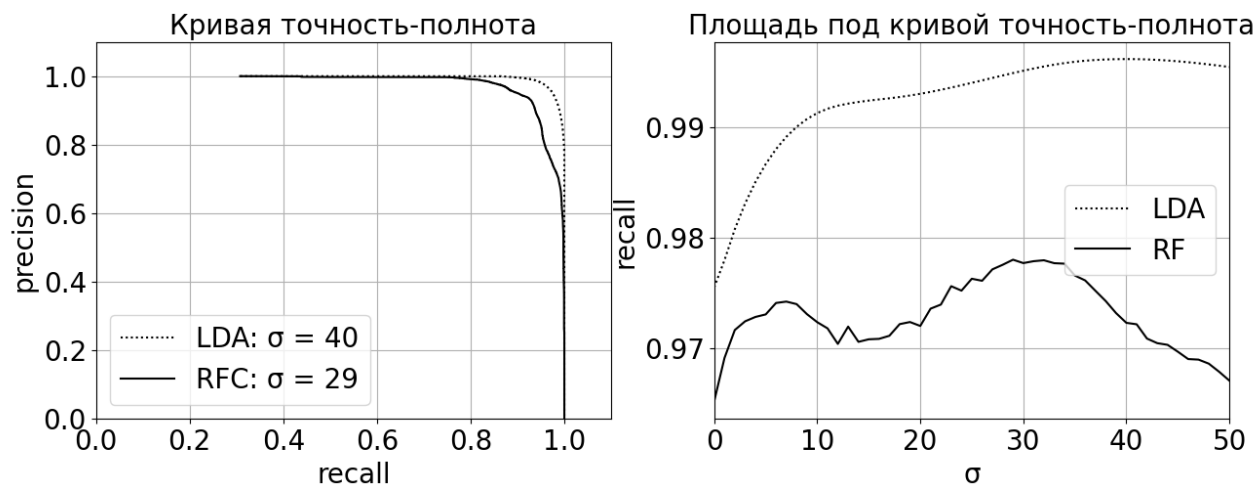


Рис. 6. Кривые точность-полнота и зависимости площади под кривой точность-полнота от параметра глубины размытия σ

Выводы

Результаты исследования показали достаточно высокую эффективность предложенных подходов к решению задачи обнаружения и выделения клубней картофеля на фоне грунта. Метод LDA продемонстрировал более высокие результаты по качеству классификации при значительно меньшей вычислительной сложности и его можно рекомендовать для реализации в СТЗ.

Оптимальное значение параметра глубины размытия σ может быть найдено путем максимизации площади под кривой точность-полнота для обучающего изображения.

Библиографический список

1. R.O. Duda, P.E. Hart, D.G. Stork. Pattern Classification (Second Edition), section 2.6.2.
2. Breiman, «Random Forests», Machine Learning, 45(1), 5-32, 2001.

УДК 004.932; ГРНТИ 28.23.15

Пороговые методы выделения объекта интереса на изображениях на основе методов Отцу, Капура и Тсаллиса

П.В. Бабаян, Я.А. Буянкина

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

Аннотация. В работе рассматриваются методы пороговой сегментации изображения для выделения объекта интереса. Описаны разные подходы к вычислению порога бинаризации. Проведены исследования на различных типах изображений, для каждого сюжета вручную формировались маски объектов, а затем рассчитывались частоты правильного (TP – True Positive) и ложного выделения (FP – False Positive). График зависимости TP от FP позволяет оценить качество выделения объекта (Receiver Operating Characteristic или ROC-кривая). Оценены эффективности каждого метода для своих определённых целей.

Ключевые слова: пороговая сегментация изображения, выделение объекта интереса, ROC-характеристика

THRESHOLD METHODS FOR SELECTING AN OBJECT OF INTEREST IN AN IMAGE BASED ON OTSU, KAPUR AND TSALLIS METHODS

P.V. Babayan, Y.A. Buyankina

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

Annotation. The paper considers the methods of threshold segmentation of the image to identify the object of interest. Different approaches to calculating the binarization threshold are described. Studies were conducted on various types of images, object masks were manually formed for each plot, and then the frequencies of correct (TP – True Positive) and false selection (FP – False Positive) were calculated. The graph of TP versus FP dependence allows you to evaluate the quality of object allocation (Receiver Operating Characteristic). The effectiveness of each method for its specific purposes is evaluated.

Keywords: threshold image segmentation, object of interest selection, ROC characteristic

В области обработки изображений сегментация широко используется для извлечения интересующей части в цифровом кадре.

Простейший метод – пороговая сегментация, состоит в разделении гистограммы изображения на две (в сложных случаях и более) части с помощью единого глобального порога. После этого сегментация осуществляется путем поэлементного сканирования изображения, при этом каждый пиксель отмечается как относящийся к объекту или фону, в зависимости от того, превышает ли яркость данного пикселя значение порога или нет. Успешность этого метода целиком зависит от того, насколько хорошо гистограмма изображения поддается разделению.

Определение величины порога с помощью гистограммы яркостей является простым методом, который позволяет достичь «чистой» сегментации, если гистограмма изображения носит четко выраженный бимодальный характер.

Метод Отцу

Метод Отцу — это алгоритм вычисления порога бинаризации для полутонового изображения, используемый в области компьютерного распознавания образов и обработки изображений для получения бинарных изображений. С помощью данного метода вычисляется порог t , минимизирующий среднюю ошибку сегментации, т.е. среднюю ошибку от принятия решения о принадлежности пикселей изображения объекту или фону. Значения яркостей пикселей можно рассматривать как случайные величины, а их гистограмму – как оценку плотности распределения вероятностей. Метод Отцу ищет порог, уменьшающий внутриклассовую дисперсию, которая определяется как взвешенная сумма дисперсий двух классов [6]:

$$\sigma_{\omega}^2(t) = \omega_1(t)\sigma_1^2(t) + \omega_2(t)\sigma_2^2(t), \quad (1)$$

где веса ω_1, ω_2 — это вероятности принадлежности точки классам 1 и 2, разделённым порогом t ;

σ_1^2, σ_2^2 — дисперсии этих классов.

Отцу показал, что минимизация внутриклассовой дисперсии равносильна максимизации межклассовой дисперсии:

$$\sigma_b^2(t) = \sigma^2 - \sigma_{\omega}^2(t) = \omega_1(t)\omega_2(t)[\mu_1(t) - \mu_2(t)]^2, \quad (2)$$

которая выражается в терминах среднего арифметического классов μ_1, μ_2 которое, в свою очередь, может обновляться итеративно. Эта идея привела к эффективному алгоритму.

Метод Капура

Метод Капура относится к энтропийным методам бинаризации изображений [1]. Энтропия Капура — это метрика для многоуровневой сегментации, которая разделяет изображение на разные классы, а величина энтропии определяет, является ли класс однородным. Этот подход имеет свои преимущества, такие как простота реализации и высокая скорость работы, что делает его полезным для многих задач. Предполагается, что $T = [t_1, t_2, \dots, t_{k-1}]$ — представляет комбинацию пороговых значений, которые разделяют изображение на различные классы [2]. Тогда энтропия Капура будет равна:

$$f_{\text{капура}}(T) = \sum_{j=1}^k H_j^c. \quad (3)$$

Как правило, каждое значение энтропии вычисляется независимо на основе конкретного значения T . Для многоуровневой пороговой обработки это можно выразить как

$$H_k^c = \sum_{j=t_k+1}^L \frac{Ph_j^c}{\omega_{k-1}^c} \ln \left(\frac{Ph_j^c}{\omega_{k-1}^c} \right), \quad (4)$$

где Ph_j^c — распределение вероятностей уровней интенсивности;

C — единица (1) для черно-белых изображений;

ω_{k-1}^c вероятность принадлежности точки к классу k [6].

Метод Тсаллиса

Недавние разработки статистической механики, основанные на концепции неэкстенсивной энтропии, также называемой энтропией Тсаллиса, усилили интерес к исследованию возможного распространения энтропии Шеннона на алгоритмы обработки изображений. Этот интерес возникает в основном из-за сходства между энтропийными функциями Шеннона и Больцмана-Гиббса [3].

Энтропия Тсаллиса основана на сегментации изображений с помощью принципа максимальной энтропии.

Функция Тсаллиса изначально была выведена из теории Шеннона и может быть определена как

$$S_q = \frac{1 - \sum_{j=1}^T (p_j)^q}{q-1}, \quad (5)$$

где T — пороговое значение, а q — индекс энтропии [1].

Экспериментальные исследования алгоритмов

Экспериментальные исследования проводились с целью оценивания качества выделения объекта интереса на изображениях. Использовался набор изображений различного характера и формата.

Для определения правильности выделения был применён метод ROC-графика (Receiver Operating Characteristic - Рабочая Характеристика Приёмника). Методология ROC основана на теории статистических решений и была разработана в контексте электронного обнаружения сигналов и проблем с радарными в начале 1950-х годов. Кривые истинного и ложного выделения могут быть использованы для выбора рабочей точки, которая позволила бы обеспечить оптимальный баланс между положительным и ложноположительным результатами [4].

Результаты были сопоставлены двумя методами: визуальным и количественным. Для каждого сюжета (рис. 2) вручную создавались маски объектов (рис. 3), определялся порог сегментации по трём методам (рис.1), после чего определялись частоты правильного (TP – true Positive) и ложного выделения (FP – false Positive). График, отображающий зависимость TP от FP, помогает оценить качество выделения объектов (рис. 4).



Рис. 1. Результат пороговой сегментации по трём методам



Рис. 1. Оригинальное изображение дорожного знака

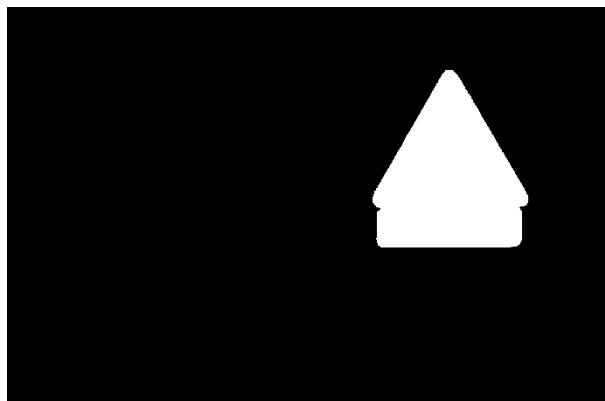


Рис. 2. Бинарная маска объекта интереса на оригинальном изображении

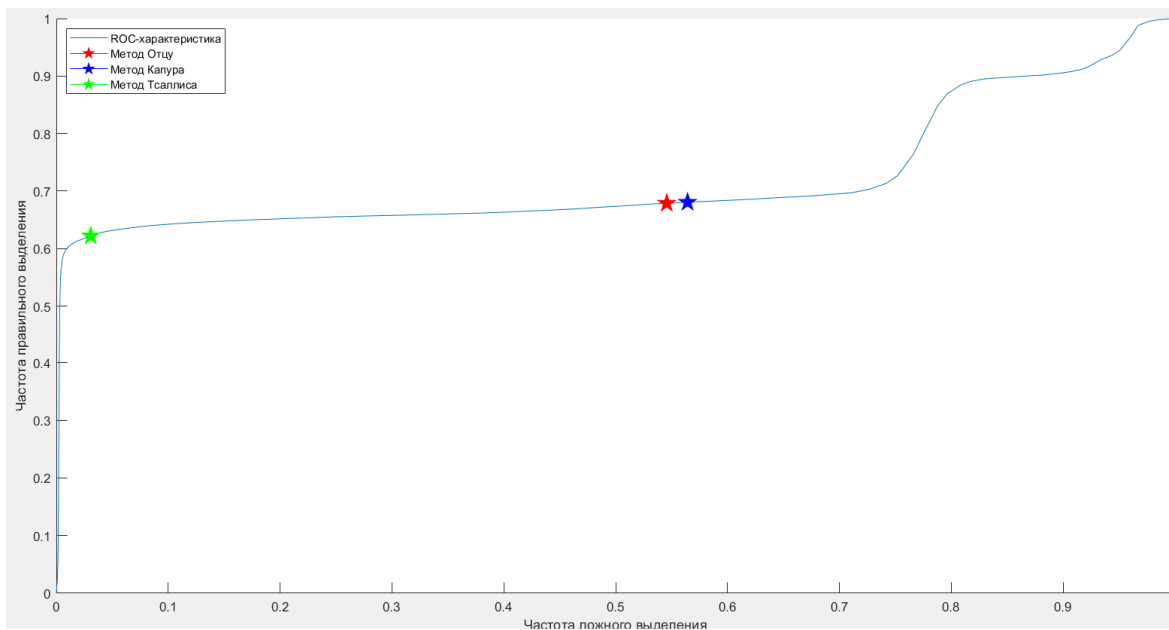


Рис. 4. ROC-характеристика с маркерами трёх методов

Результаты экспериментов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты экспериментальных исследований алгоритмов

Изображение	Метод	Порог	FP	TP
Дорожный знак	Отцу	0.4196	0.5457	0.6787
	Капур	0.4078	0.5643	0.6805
	Тсаллис	0.7294	0.0307	0.6219
Номер автомобиля	Отцу	0.298	0.2605	0.808
	Капур	0.4706	0.0071	0.6376
	Тсаллис	0.0353	1	0.9998
Штрихкод (сгущёнка)	Отцу	0.4353	0.2515	0.7498
	Капур	0.4392	0.2515	0.7498
	Тсаллис	0.6196	0.1069	0.6419
Штрихкод (бутылка)	Отцу	0.4275	0.1597	0.8726
	Капур	0.4471	0.1462	0.8576
	Тсаллис	0.7234	0.0478	0.5519
QR-код	Отцу	0.3725	0.3897	0.6947
	Капур	0.5176	0.1756	0.6518
	Тсаллис	0.3098	0.3965	0.7142
Фотография спутника	Отцу	0.3529	0.2468	0.4289
	Капур	0.6118	0.1582	0.1314
	Тсаллис	0.0824	0.3149	0.8751
Фотография машины	Отцу	0.4588	0.0574	0.5484
	Капур	0.4196	0.0713	0.5979
	Тсаллис	0.0863	0.97	0.886
Томография мозга	Отцу	0.2235	0.0993	1
	Капур	0.6471	0.001	0
	Тсаллис	0.3765	0.0364	0.9899
Ортопантомография (рентген зуба)	Отцу	0.3725	0.1148	0.956
	Капур	0.4078	0.0855	0.9359
	Тсаллис	0.6314	0.0074	0.4532
Маммография (рентген молочной железы)	Отцу	0.2	0.307	1
	Капур	0.3725	0.1079	1
	Тсаллис	0.5725	0.0081	0.727

На основании проведённых экспериментов можно сделать вывод, что каждый метод сегментации подходит для своих целей: так метод энтропии Тсаллиса наиболее эффективен для обработки медицинских снимков будь то рентген, томография или маммография [5], метод Капура — для обнаружения штрихкодов, QR-кодов, а метод Отцу хорошо показал себя на всех изображениях выборки.

Заключение

В ходе данной работы были реализованы алгоритмы пороговой сегментации изображений разными методами, проведены сравнительные экспериментальные исследования, в результате которых показана эффективность применения того или иного метода.

В дальнейшем планируется расширить количество методов сегментации, добавить фильтрацию, чтобы уменьшить шум и ложные выделения. Возможно реализовать на других языках программирования с применением нейронных алгоритмов (алгоритм оптимизации роя частиц, алгоритм оптимизации муравьиной колонии и т.д.).

Библиографический список

1. Amelia Carolina Sparavigna. On the Role of Tsallis Entropy in Image Processing — International Scientific Research Journal, 2015, vol.1(6), pp.16-24, DOI: 10.18483/IRJSci.79, Available at: <https://hal.science/hal-01352704v1>
2. K. Suresh Manic, R. Krishna Priya, V. Rajinikanth Image Multithresholding based on Kapur/Tsallis Entropy and Firefly Algorithm — Indian Journal of Science and Technology, 2016, vol.9(12), pp.1-6, DOI:

10.17485/ijst/2016/v9i12/89949, Available at: <https://indjst.org/articles/image-multithresholding-based-on-kapurtsallis-entropy-and-firefly-algorithm>

3. P.D. Sathya, R. Kayalvizhi PSO-Based Tsallis Thresholding Selection Procedure for Image Segmentation — International Journal of Computer Applications (0975 – 8887), vol. 5– No.4, August 2010, pp. 39-46, DOI: <https://www.ijcaonline.org/archives/volume5/number4/903-1279/>

4. Zweig M. H., Campbell G. Receiver-operating characteristic (ROC) plots: a fundamental evaluation tool in clinical medicine — Clinical chemistry. 1993, vol. 39, No. 4, pp. 561-577, DOI: 10.1093/clinchem/39.4.561 Available at: <https://doi.org/10.1093/clinchem/39.4.561>

5. Prem Kumar Kalra, Nirmal Kumar An automatic method to enhance microcalcifications using normalized Tsallis entropy — Signal Processing, vol.90, March 2010, pp. 952-958, DOI: 10.1016/j.sigpro.2009.09.012, Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165168409004034?via%3Dihub>

6. Я.А. Буянкина, П.В. Бабаян, Пороговые методы выделения объекта интереса на изображении на основе методов Отцу. Капура и Тсаллиса — Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXIX Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. ИП Коняхин А.В., 2024 г, 260 с., Available at: <https://rsreu.ru/faculties/fvt/kafedri/saprvs/konferentsiya-nit/16380-item-16380>

УДК 621. 317. 335; ГРНТИ 47.09.33

УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ

Ж.Ж. Умуркулов

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Российская Федерация, Томск, umurkulov.jamoliddin@yandex.com

Аннотация. В работе представлены результаты разработки лабораторной установки для исследования температурной зависимости диэлектрической проницаемости сегнетоэлектриков конденсаторным методом. Рассмотрена блок-схема устройства нагрева и контроля температуры исследуемого образца материала.

Ключевые слова: сегнетоэлектрики, устройство, температурные зависимости, диэлектрическая проницаемость.

SETUP FOR STUDYING THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE DIELECTRIC PERMITTIVITY OF FERROELECTRICS

J.J. Umurkulov

National Research Tomsk state university,
Russia, Tomsk, umurkulov.jamoliddin@yandex.com

The summary. The paper presents the results of the development of a laboratory setup for studying the temperature dependence of the permittivity of ferroelectrics using the capacitor method. The block diagram of the device for heating and controlling the temperature of the material sample under study is considered

Keywords: ferroelectrics, device, temperature dependences, permittivity.

Получение достоверной информации о зависимости диэлектрической проницаемости материалов от температуры [1-3] является важной задачей при разработке конструкций радиоаппаратуры. В зависимости от конкретного типа материала могут наблюдаться различные температурные особенности в спектре диэлектрической проницаемости. Одним из востребованных классов материалов в радиоэлектронной промышленности являются сегнетоэлектрики [4], диэлектрическая проницаемость которых нелинейно изменяется с ростом температуры и требуют точного контроля температуры в процессе проведения измерения электрофизических свойств.

В данной работе представлена разработанная лабораторная установка (рис. 1) для исследования температурной зависимости диэлектрической проницаемости сегнетоэлектриков конденсаторным методом.

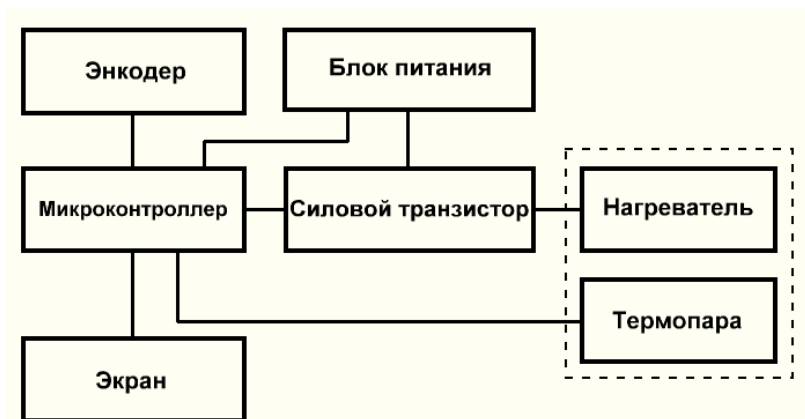


Рис. 1. Принципиальная схема системы нагрева образцов материалов

Схема работает следующим образом: напряжение с термопары поступает на микросхему MAX 6675. В качестве управляющей микропроцессорной системы используется электронная платформа Arduino Uno на базе микроконтроллера Atmega 328. Дисплей на органических светодиодах SSD1306 позволяет производить обмен данными по средствам протокола I²C по двум цифровым линиям (тактирующей линии SCL и линии передачи данных SDA). Также по шине I²C подключены термоэлектрические преобразователи типа К. Нагревательным элементом выполнены на основе токопроводящей керамики, обладающей положительным температурным коэффициентом сопротивления. Такое решение обеспечивает быструю реакцию на изменения температуры и минимальную инерционность. Нагревательный элемент рассчитан на напряжение 12 В и мощность 40 Вт, что делает его оптимальным для задач термостабилизации. Внешний вид готового лабораторного макета данной системы представлен на рисунке 2.



Рис. 2. Передняя (а) и задняя панели корпуса (б) установки для исследования температурной зависимости диэлектрической проницаемости сегнетоэлектриков

Для длительного поддержания требуемой температуры в программе управления микроконтроллером был реализован алгоритм ПИД-регулятора. В основе его работы лежит комбинированный подход, включающий пропорциональный компонент (*P*) для моментального реагирования на отклонения температуры; интегральный компонент (*I*) для компенсации накопленных ошибок и дифференциальный компонент (*D*) для предотвращения резких скачков температуры (рис. 3) [5].

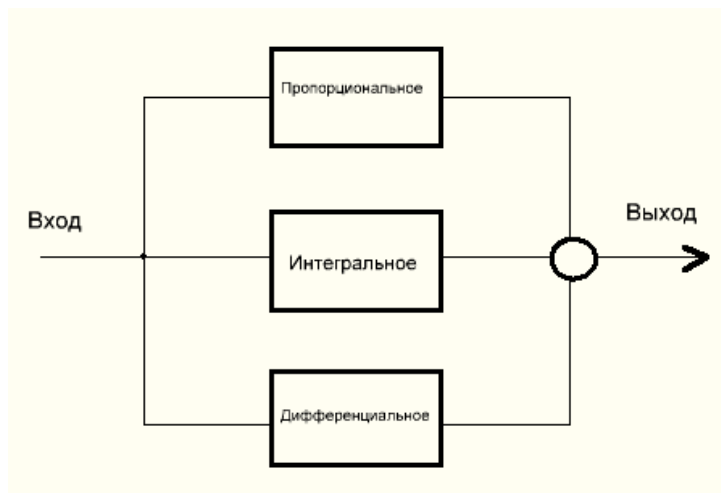


Рис. 3. ПИД-регулятор

В ходе тестирования системы на образце титаната бария было выявлено, что использование пропорционального регулятора позволяет быстро реагировать на изменения температуры, но не устраняет колебания. Введение ПИД-регулирования с коэффициентами $P = 60$, $I = 0,5$, $D = 20$ позволило добиться высокой стабильности нагрева при $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Результаты его работы при заданных температурах ($135\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $200\text{ }^{\circ}\text{C}$) приведены на рисунке 4.

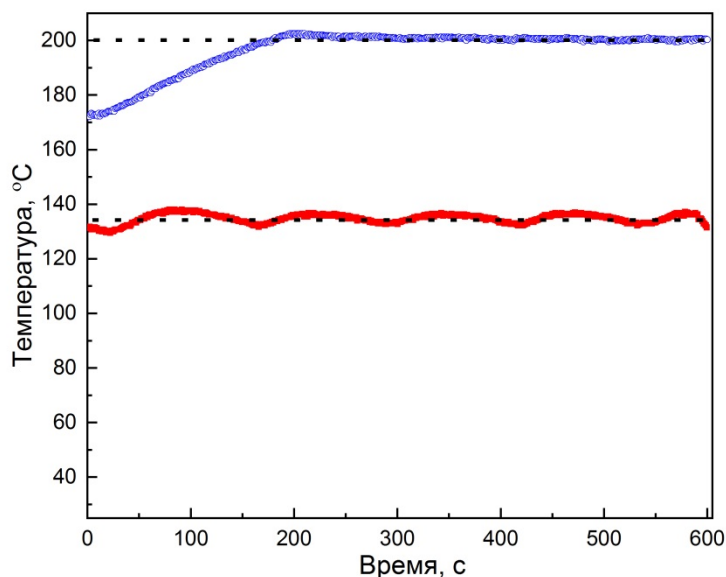


Рис. 4. Зависимость температуры от времени

На основе собранных данных был проведён анализ влияния параметров регулятора на стабильность температуры. Результаты подтвердили, что оптимальные коэффициенты позволяют минимизировать отклонения и обеспечить точное поддержание заданной температуры. Разработанная система термостабилизации образцов материалов может быть применена в различных сферах, включая измерительное оборудование СВЧ и КВЧ диапазонов. Использование ПИД-регулирования и компактных керамических нагревателей позволило создать эффективное и энергоэкономичное решение для поддержания стабильной температуры исследуемых образцов. Будущие исследования будут направлены на оптимизацию алгоритмов управления для адаптации системы к различным температурным режимам.

Работа проведена на оборудовании ЦКП «Центр радиофизических измерений, диагностики и исследования параметров природных и искусственных материалов» Национального исследовательского Томского государственного университета.

Библиографический список

1. Петровнин К. В. Температурная зависимость диэлектрических спектров / К. В. Петровнин, Р. Р. Латыпов // Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo), 2015 25th International Crimean Conference. – IEEE, 2015. – С. 958 – 959.
2. Жуковский П.В. Диэлектрические свойства соединений $Cd_{1-x}Fe_xSe$ / П. В. Жуковский, Я. Партыка, П. Венгерэк // Физика и техника полупроводников. 2013. № 5. С. 101 – 104.
3. Tabata H. Formation of artificial $BaTiO_3/SrTiO_3$ superlattices using pulsed laser deposition and their dielectric properties / H. Tabata, H. Tanaka, T. Kawai // Applied physics letters. 1994. Т. 65. № 15. С. 1970 – 1972.
4. Зависимость диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика $BaTiO_3$. - 2024. - URL: <https://swsu.ru/structura/aup/upiakvk/oad/disser-emelianov.pdf>. (дата обращения 04.06.2024).
5. Исследование методов настройки параметров пид-регулятора – 2020. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-metodov-nastroyki-parametrov-pid-regulyatora> (дата обращения 03.14.2024).

УДК 004.896, ГРНТИ 28.41.35

УДАЛЕННЫЙ МОНИТОРИНГ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ И ЭМОЦИОНАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ ЧЕЛОВЕКА НА ОСНОВЕ МУЛЬТИМОДАЛЬНОГО АНАЛИЗА ВИДЕОДАНЫХ

С.С. Корчагина, А.Н. Майка

*Воронежский государственный университет инженерных технологий,
Российская Федерация, Воронеж, kss29995@mail.ru*

Аннотация. Работа посвящена разработке системы для неинвазивного определения ключевых физиологических параметров (пульс, дыхание, артериальное давление) и эмоционального состояния человека на основе анализа видеоданных. Система использует методы компьютерного зрения и машинного обучения для извлечения информации из видеопотока, объединяя различные модальности данных, что позволяет значительно повысить точность мониторинга. Этот подход позволяет проводить мониторинг состояния человека без физического контакта, что особенно важно в условиях, где традиционные методы затруднены или недоступны. Система может быть применена в медицине, образовании, бизнесе и на производстве для удаленного наблюдения за состоянием здоровья и эмоциональным фоном. *Ключевые слова:* удаленный мониторинг, мультимодальный анализ, компьютерное зрение, машинное обучение, физиологические параметры, эмоциональное состояние, MediaPipe, FFPD.

REMOTE MONITORING OF PHYSIOLOGICAL AND EMOTIONAL STATES OF A PERSON BASED ON MULTIMODAL VIDEO DATA ANALYSIS

S.S. Korchagina, A.N. Mayka

*Voronezh State University of Engineering Technologies,
Russian Federation, Voronezh, kss29995@mail.ru*

Abstract. This paper is dedicated to the development of a system for non-invasive determination of key physiological parameters (pulse, respiration, blood pressure) and the emotional state of a person based on video data analysis. The system utilizes computer vision and machine learning methods to extract information from a video stream, integrating various data modalities, which significantly enhances monitoring accuracy. This approach enables continuous human state monitoring without physical contact, which is particularly important in situations where traditional methods are challenging or unavailable. The system can be applied in medicine, education, business, and industry for remote observation of health conditions and emotional states.

Keywords: remote monitoring, multimodal analysis, computer vision, machine learning, physiological parameters, emotional state, MediaPipe, FFPD.

Физиологические и эмоциональные сигналы являются важнейшими индикаторами для мониторинга состояния здоровья человека. Традиционные методы отслеживания пульса, дыхания, артериального давления и соответствующих физиологических сигналов в основном включают в себя электрокардиографию (ЭКГ) пульсоксиметрию и тонометрию. Однако сложная настройка и ограниченная масштабируемость датчиков создают практические трудности для применения в различных сферах жизни.

Удаленный мониторинг физиологических и эмоциональных состояний человека на основе мультимодального анализа видеоданных представляет собой инновационный подход, который позволяет оценивать состояние здоровья и эмоциональный фон без необходимости физического контакта. Такой метод особенно полезен в медицинских учреждениях для удаленного мониторинга пациентов. В бизнесе и маркетинге он позволяет анализировать эмоциональные реакции клиентов на продукты или рекламу. В образовательных учреждениях система может отслеживать уровень вовлеченности и стресса студентов, а в промышленности — оценивать физическое состояние работников, снижая риски профессионального выгорания.

Для анализа видеоданных используются современные методы глубокого обучения, такие как LSTM и трансформеры, которые позволяют эффективно обрабатывать длинные временные последовательности. Механизмы внимания помогают выделить ключевые 468 точек на лице, которые наиболее информативны для анализа эмоций. Физиологические сигналы, такие как ЭКГ и PPG, интегрируются с видеоданными для повышения точности оценки состояния.

Одним из ключевых методов, используемых в данной работе, является FFPD (Facial Feature Point Detection) на основе библиотеки MediaPipe. Этот метод применяется для детекции ключевых точек лица, позволяя анализировать мимику, эмоции и другие характеристики. MediaPipe предоставляет мощные инструменты для реализации таких методов, в том числе готовые решения для обработки 468 ключевых точек лица. Благодаря высокой эффективности работы в режиме реального времени библиотека MediaPipe является оптимальным инструментом для задач анализа лицевых данных.

Основные этапы работы:

1. Детекция лицевых точек – инициализация Face Mesh, который распознает 468 ключевых точек лица, включая глаза, нос, рот и контуры.
2. Обработка видеопотока – захват кадров с камеры, конвертация изображения в RGB и передача данных в модель.
3. Глубокий анализ признаков – извлечение координат в 3D-пространстве, что позволяет учитывать изменения лица во времени.
4. Визуализация данных – наложение ключевых точек на изображение и построение моделей эмоций и физиологических параметров.

Экспериментальные исследования подтверждают высокую точность мультимодального подхода при распознавании эмоций и физиологических состояний. В частности, метод MVP демонстрирует превосходство над традиционными методами, достигая точности до 95% на тестовых наборах данных. Аналогичные результаты были получены Hu Y., Xu J., Song J. и Lu H. в исследовании, проведенном в Корнелльском университете (Cornell University). В своей работе «Multi-modal Residual Perceptron Network for Audio-Video Emotion Recognition» авторы рассмотрели мультимодальный анализ видеоданных и аудиосигналов, что позволило достичь высокой точности в распознавании эмоций. Эти результаты подтверждают эффективность применения глубокого обучения для удаленного мониторинга состояния человека [1].

Для визуализации результатов работы системы можно использовать несколько примеров. На рисунке 1 показано лицо с выделенными 468 ключевыми точками, которые используются для анализа мимики и эмоций. Эти точки охватывают все основные области лица, что позволяет точно определять изменения в мимике и эмоциональном состоянии.

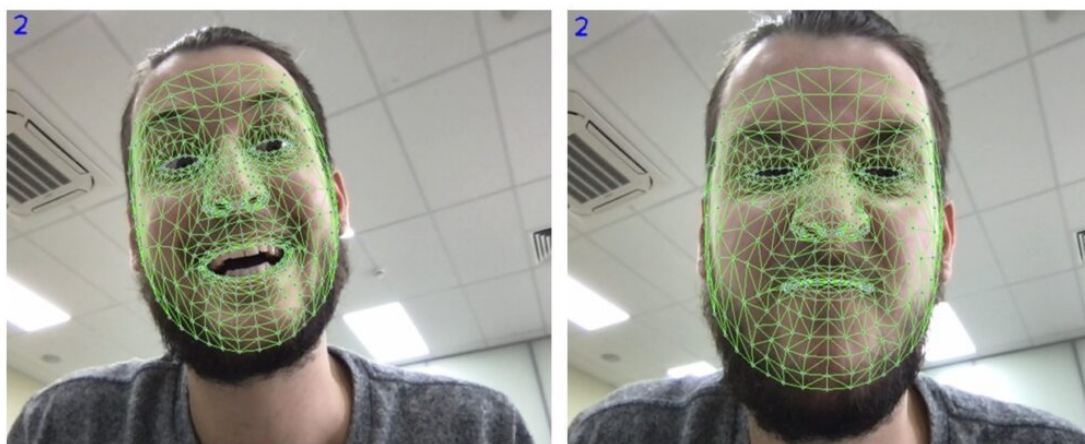


Рис. 1. Карта ключевых точек лица

На рисунке 2 показана карта эмоций, построенная на основе анализа мимики. Карта позволяет визуализировать эмоциональное состояние человека, что может быть полезно в психологии и маркетинге.

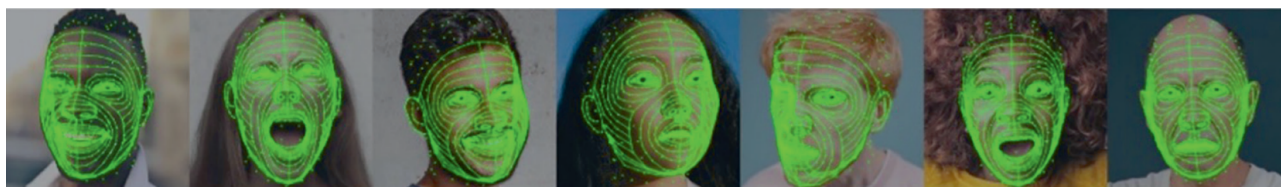


Рис. 2. Карта эмоций, построенная на основе анализа мимики

Важно отметить, что MediaPipe сам по себе не анализирует эмоции, пульс или дыхание, а лишь определяет ключевые точки лица. Однако эти данные могут быть использованы для извлечения физиологических параметров. Например, микроскопические изменения цвета кожи могут указывать на частоту сердечных сокращений (rPG), а мелкие движения губ и носа — на ритм дыхания. Анализ выражений лица позволяет оценивать эмоциональное состояние человека. Таким образом, MediaPipe выполняет детекцию лицевых точек, а их анализ требует дополнительных алгоритмов, способных интерпретировать физиологическое и эмоциональное состояние человека [2].

Эти дополнительные модели могут включать в себя методы глубокого обучения и традиционные алгоритмы обработки сигналов, которые позволяют извлекать и интерпретировать физиологические параметры с высокой точностью.

Для оценки пульса могут использоваться методы удаленной фотоплетизмографии (rPPG), основанные на анализе микроизменений цвета кожи, вызванных циркуляцией крови. Эти изменения практически незаметны глазу, но могут быть выделены с помощью алгоритмов машинного обучения, которые анализируют разницу между последовательными кадрами видеопотока.

Мониторинг дыхания возможен благодаря выявлению незначительных движений губ, носа и области груди, которые происходят при каждом вдохе и выдохе. Для этого применяются сверточные нейросети (CNN), способные детектировать малейшие колебания изображения, а также рекуррентные архитектуры (LSTM, GRU), анализирующие временные последовательности движения.

Оценка эмоционального состояния человека строится на основе анализа мимики и динамики выражений лица. Например, сочетание распознавания ключевых точек MediaPipe с предсказательными моделями на основе AffectNet или DeepFace позволяет точно идентифицировать базовые эмоции, такие как радость, грусть, гнев или удивление. Более сложные ар-

хитектуры, такие как трансформеры и нейросетевые энкодеры, способны анализировать не только статичные выражения лица, но и их динамические изменения, что особенно важно для определения уровня стресса, усталости и когнитивного состояния [3].

Таким образом, объединение MediaPipe с моделями глубокого обучения позволяет анализировать не только выражение лица, но и физиологические параметры человека, что делает возможным его интеграцию в системы мониторинга здоровья и эмоций.

Одним из ключевых преимуществ мультимодального анализа видеоданных является его неинвазивность. Традиционные методы мониторинга физиологических параметров, такие как электрокардиография (ЭКГ) или пульсоксиметрия, требуют непосредственного контакта с телом пациента. Это может вызывать дискомфорт, особенно при длительном использовании, и ограничивает возможности применения в повседневной жизни. Удаленный мониторинг на основе видеоданных устраняет эту проблему, позволяя оценивать состояние человека без необходимости использования датчиков или электродов. Это особенно важно в условиях пандемий, когда минимизация физического контакта становится критически важной.

Кроме того, отсутствие необходимости в физических датчиках упрощает внедрение таких технологий в масштабируемые системы мониторинга. В отличие от традиционных методов мониторинга, таких как ЭКГ или тонометрия, требующих отдельного оборудования для каждого пациента, мультимодальный анализ видеоданных позволяет одновременно отслеживать состояние нескольких человек с помощью одной системы. Это значительно снижает затраты и упрощает процесс наблюдения, особенно в медицинских учреждениях и других сферах, где важно контролировать состояние большого числа людей.

Благодаря применению современных алгоритмов глубокого обучения система способна не только фиксировать эмоциональное состояние человека, но и отслеживать его изменения в динамике, что особенно важно для долгосрочного мониторинга. Использование рекуррентных нейросетей (LSTM, GRU) и трансформеров позволяет эффективно анализировать последовательности видеокадров, выявляя паттерны в изменении мимики и движениях лица. Дополнительно, интеграция видеоданных с физиологическими параметрами, такими как пульс и дыхание, значительно повышает достоверность результатов. Например, анализ 468 ключевых точек лица, полученных с помощью MediaPipe, обеспечивает детализированную картину эмоционального состояния человека, выявляя микроизменения выражения лица, которые сложно заметить невооруженным глазом.

Тем не менее, несмотря на высокую точность мультимодального анализа, данная технология не лишена ограничений. Одним из ключевых факторов, влияющих на точность, является качество видеопотока. Такие параметры, как освещение, разрешение камеры и угол съемки, могут значительно исказить анализ данных. Например, при недостаточном освещении или резких тенях система может неверно определить расположение ключевых точек, что приведет к ошибкам в оценке эмоций и физиологических параметров. Улучшить точность распознавания можно с помощью алгоритмов предобработки изображений, таких как коррекция освещения, шумоподавление и адаптивное повышение резкости, однако это увеличивает вычислительную нагрузку.

Еще одним значительным ограничением является высокая требовательность к вычислительным ресурсам, особенно при обработке видеоданных в реальном времени. Современные глубинные нейросети, включая трансформеры, требуют значительных мощностей, особенно при анализе видеопотока с высокой частотой кадров. Это может стать проблемой для мобильных устройств и систем с ограниченными вычислительными возможностями. Оптимизировать работу можно за счет сжатия данных, уменьшения размерности признакового пространства и квантования модели, однако подобные меры могут снижать точность предсказаний. Альтернативным решением является использование гибридных вычислений, совмещающих локальную обработку и облачные ресурсы, что позволяет обеспечить баланс между точностью и производительностью.

Кроме технических аспектов, важно учитывать и этические вопросы. Удаленный мониторинг физиологических и эмоциональных состояний человека может вызвать беспокойство в отношении конфиденциальности и защиты данных. Например, использование ви-

деокамер для анализа эмоций в общественных или рабочих пространствах может восприниматься как нарушение личного пространства. Для минимизации подобных рисков необходимо разрабатывать четкие стандарты и нормативные требования, регулирующие использование таких технологий, а также обеспечивать защиту данных с помощью современных методов шифрования и анонимизации.

Несмотря на вызовы, мультимодальный анализ видеоданных обладает широкими возможностями применения. В медицине он может использоваться для удаленного мониторинга пациентов, особенно людей с хроническими заболеваниями или находящихся в реабилитации. Например, система способна отслеживать изменения пульса и дыхания у пациентов с сердечно-сосудистыми заболеваниями, что позволяет своевременно предупреждать врачей о возможных осложнениях. Это не только повышает качество медицинского обслуживания, но и снижает нагрузку на персонал, обеспечивая более эффективное распределение ресурсов.

В бизнесе и маркетинге данный метод может использоваться для анализа эмоциональных реакций клиентов на продукты или рекламу. Например, система может отслеживать изменения мимики и определять, какие элементы рекламы вызывают положительные или отрицательные эмоции. Это позволяет компаниям оптимизировать свои маркетинговые стратегии и повышать удовлетворенность клиентов.

В образовательных учреждениях система может использоваться для оценки эмоционального состояния учащихся. Например, она может отслеживать уровень стресса или усталости у студентов во время экзаменов или занятий. Это позволяет преподавателям своевременно корректировать учебный процесс и улучшать условия обучения.

На производстве анализ видеоданных может использоваться для оценки физического состояния работников. Например, система может отслеживать уровень усталости или стресса у сотрудников, работающих на опасных объектах, и предупреждать о возможных рисках. Это позволяет снизить вероятность аварий и улучшить условия труда.

Для дальнейшего развития мультимодального анализа видеоданных необходимо решить несколько ключевых задач.

Во-первых, требуется улучшить точность анализа при низком качестве видеопотока. Это может быть достигнуто за счет использования более сложных алгоритмов предобработки изображений или интеграции дополнительных датчиков, таких как инфракрасные камеры.

Во-вторых, необходимо оптимизировать вычислительные ресурсы для обработки видеоданных в реальном времени. Это может включать разработку более эффективных алгоритмов глубокого обучения или использование специализированных аппаратных решений, таких как графические процессоры (GPU) или тензорные процессоры (TPU).

В-третьих, важно разработать четкие стандарты и правила, регулирующие использование систем удаленного мониторинга. Это включает вопросы конфиденциальности, защиты данных и этики. Например, необходимо обеспечить, чтобы данные, собранные системой, использовались только в законных целях и не передавались третьим лицам без согласия пользователя. Наконец, важно расширить область применения мультимодального анализа видеоданных. Например, система может быть интегрирована с умными домами для мониторинга состояния пожилых людей или с системами виртуальной реальности для улучшения пользовательского опыта.

Мультимодальный анализ видеоданных открывает новые возможности для удаленного мониторинга здоровья и эмоционального состояния человека. Его неинвазивность, высокая точность и способность к масштабированию делают эту технологию перспективной для использования в медицине, образовании, маркетинге и промышленности.

Однако для широкомасштабного внедрения таких систем важно повысить их устойчивость к изменениям внешних условий, оптимизировать вычислительные затраты и разработать стандарты защиты персональных данных. Решение этих задач позволит создать более надежные, доступные и этически обоснованные системы мониторинга, которые смогут применяться в различных сферах деятельности.

Библиографический список

1. Hu Y., Xu J., Song J., Lu H. Multi-modal Residual Perceptron Network for Audio-Video Emotion Recognition // arXiv.org [Электронный ресурс] - 2021 - Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2107.10742> - Дата доступа: 17.02.2025.
2. Бойцев А.А., Волчек Д.Г., Магазенков Е.Н., Неваев М.К., Романов А.А., Детекция ключевых точек лица с помощью капсульных нейронных сетей // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики университета [Электронный ресурс] - 2023 - Том 23, №3 - Режим доступа: <https://ntv.ifmo.ru/file/article/22049.pdf> - Дата доступа: 15.02.2025.
3. Цзыцзэ Ян, Дэтао Бай, И-Синь Пэн, Сихан Вэй, Расширение возможностей MLLM для видео с помощью детального моделирования лиц и звука для мультимодального анализа эмоций // Университет Сунь Ятсена, Китай [Электронный ресурс] - 2025 - Режим доступа: <https://arxiv.org/html/2501.09502v1> - Дата доступа: 15.02.2025

УДК 621.371; ГРНТИ 50

РЕКУРРЕНТНАЯ НЕЙРОННАЯ СЕТЬ С КОМБИНИРОВАННЫМ ОБУЧЕНИЕМ

В.П. Кузнецов

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

Аннотация. Предложена рекуррентная нейронная сеть для идентификации динамических объектов. Для обучения сети используется взвешенная сумма выходного сигнала самой нейронной сети и выходного сигнала динамического объекта (усиление учителем). Такое комбинированное обучение приводит к уменьшению времени обучения нейронной сети при достижении необходимой точности идентификации. Приводятся экспериментальные результаты построения нейросетевой модели нелинейного динамического объекта.

Ключевые слова: нейронная сеть, весовой коэффициент, функция активации, сигнал ошибки, алгоритм обучения, целевая функция, градиент, частная производная.

RECURRENT NEURAL NETWORK WITH COMBINE TRAINING

V.P. Kuznetsov

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

The summary. Recurrent neural network for identification of dynamic objects is proposed. The network uses weigh sum of neural network output signal and dynamic object output signal (teacher forcing). Such combine training guarantees a reduction of time learning and a safety of identification accuracy. The experimental results of nonlinear dynamic object identification are presented.

Key words: neural network, weight coefficient, activation function, error signal, learning algorithm, target function, gradient, partial derivative.

Постановка задачи

Применение нейронных сетей (НС) для идентификации динамических объектов (ДО) было предложено в работе [1]. Нейронная сеть прямого распространения формирует модель объекта в виде разностного уравнения [2,3]

$$\hat{y}_n = f(u_n, u_{n-1}, \dots, u_{n-q}).$$

Рекуррентная нейронная сеть может реализовать более адекватную модель объекта

$$\hat{y}_n = f(\hat{y}_{n-1}, \hat{y}_{n-2}, \dots, \hat{y}_{n-p}, u_n, u_{n-1}, \dots, u_{n-q}).$$

Типовая функциональная схема процедуры идентификации на основе рекуррентной НС приведена на рисунке 1.



Рис. 1. Идентификация ДО на основе рекуррентной НС

На входы ДО и НС подается одна и та же последовательность u_n . В классическом варианте на рекуррентный вход НС подается ее же выходной сигнал \hat{y}_n (переключатель в положении 1). Обучение сети проводится на основе сигнала рассогласования $\varepsilon_n = y_n - \hat{y}_n$ и занимает значительное время. Для сокращения времени обучения предложен другой вариант подключения НС (переключатель в положении 2), когда на рекуррентный вход сети подается выходной сигнал ДО y_n . Этот прием получил название «усиление учителем» [4-6]; он приводит к значительному сокращению времени обучения. Однако НС, как модель ДО, характеризуется низким качеством: при работе НС в автономном режиме после возврата переключателя в положение 1 наблюдается значительное отклонение между сигналами \hat{y}_n и y_n .

Для сокращения времени обучения и повышения соответствия между ДО и НС была использована комбинация двух вариантов подключения рекуррентного входа сети. Вначале процедура идентификации проводится с помощью «усиления учителем» (переключатель в положении 2). На этом этапе весовые коэффициенты НС выводятся в окрестность истинных значений. Затем переключатель переводится в положение 1, и продолжается коррекция весовых коэффициентов в классическом варианте. Данный подход позволяет сократить время обучения НС, однако второй этап по-прежнему занимает слишком продолжительное время.

Структура нейронной сети. В данной работе развивается идея комбинированного подхода, идея которого заключается в формировании сигнала $\tilde{y}_n = \alpha \hat{y}_n + (1 - \alpha) y_n$, подаваемого на рекуррентные входы сети (рис. 2).

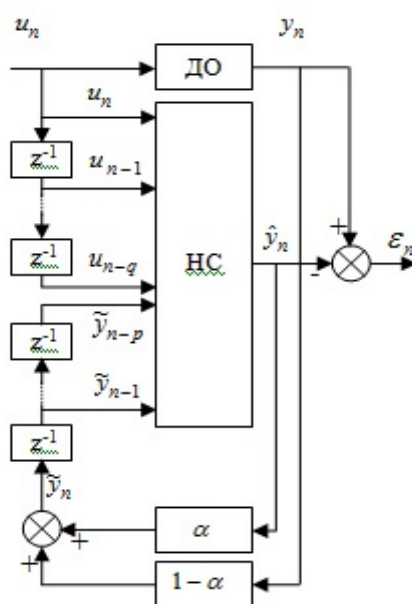


Рис. 2. Комбинированное обучение НС

Параметр α изменяется в процессе обучения сети от 0 до 1. При $\alpha = 0$ обучение проходит в режиме «усиления учителем», в рекуррентные входы НС поступают задержанные значения выходного сигнала ДО. При $\alpha = 1$ обучение проходит на основании выходного сигнала НС. При $0 \leq \alpha \leq 1$ обучение проходит с помощью взвешенного сигнала \tilde{y}_n . Процесс изменения параметра α в диапазоне от 0 до 1 может носить различный характер.

Обучение НС проведем в пакетном режиме на основе минимизации среднего квадрата ошибки

$$E(k) = \frac{1}{2N} \sum_{n=1}^N \varepsilon^2(n) \rightarrow \min_w, \quad (1)$$

где k – номер эпохи, N – число обучающих примеров в пакете.

На рисунке 3 приведена НС, содержащая два слоя нейронов.

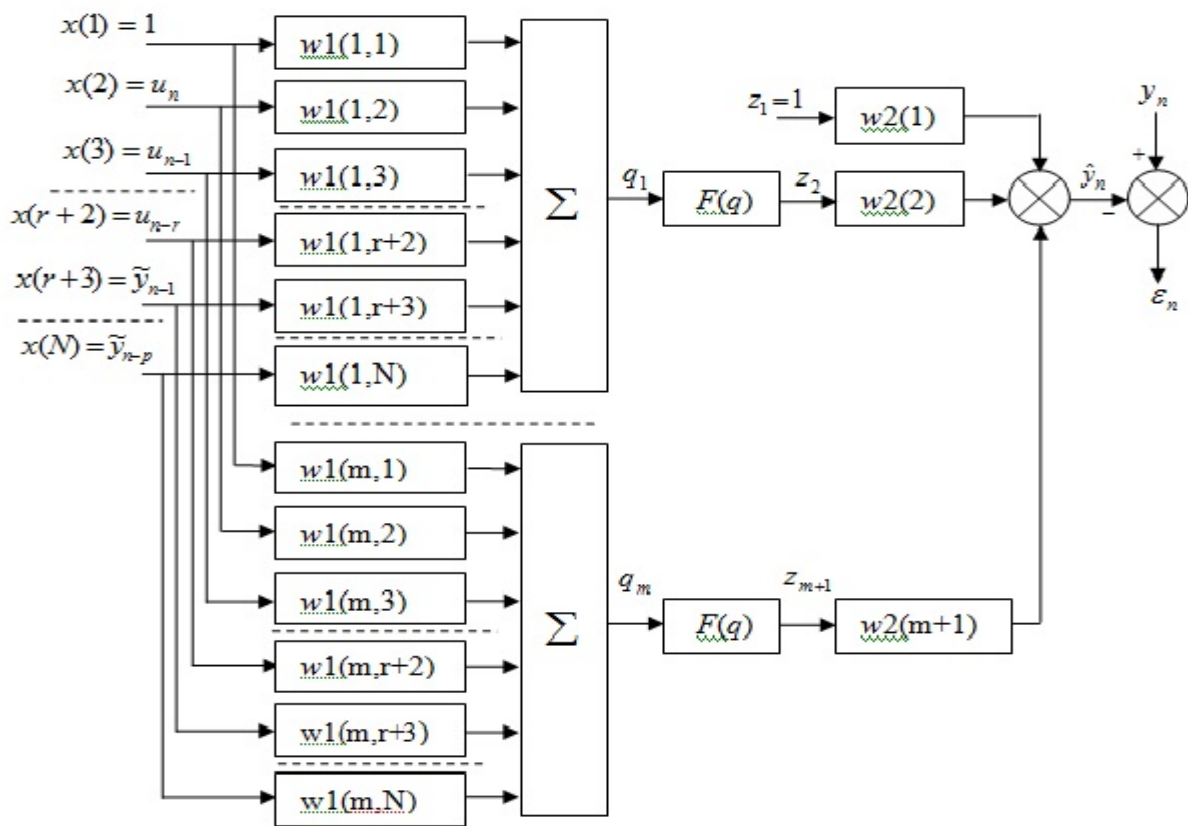


Рис. 3. Структура НС

В первом слое стоят нелинейные нейроны с сигмоидными функциями активации в виде гиперболического тангенса, второй слой представлен одним линейным нейроном. Весовые коэффициенты НС настраиваются на минимум целевой функции (1) методом градиента:

$$W(k+1) = W(k) - h * \text{grad}E(k).$$

Здесь W - вектор весовых коэффициентов НС, h - параметр обучения, $\text{grad}E$ - градиент целевой функции, состоящий из частных производных по каждому весовому коэффициенту.

Алгоритм обучения

Рассмотрим обучение выходного нейрона. Для коррекции его весовых коэффициентов $w2(l)$, $l = \overline{1, m+1}$, потребуются частные производные $\partial E / \partial w2(l)$, $l = \overline{1, m+1}$, вычисление которых должно проводиться с учетом рекуррентного характера НС. Итак,

$$\frac{\partial E(k)}{\partial w2(l)} = \frac{1}{N} \sum_n \varepsilon(n) \frac{\partial \varepsilon(n)}{\partial w2(l)} = -\frac{1}{N} \sum_n \varepsilon(n) \frac{\partial \hat{y}_n}{\partial w2(l)}, \quad \hat{y}_n = \sum_{i=1}^{m+1} z_i w2(i). \quad (2)$$

За счет рекуррентного характера НС изменение коэффициента $w2(l)$ приведет к изменению сигналов $\tilde{y}_{n-1}, \tilde{y}_{n-2}, \dots, \tilde{y}_{n-p}$ и соответственно сигналов z_2, z_3, \dots, z_{m+1} . Поэтому производная

$$\frac{\partial \hat{y}_n}{\partial w2(l)} = z_l + \sum_{i=2}^{m+1} w2(i) \frac{\partial z_i}{\partial w2(l)}. \quad (3)$$

Сигналы $z_i = F(q_{i-1})$, $i = \overline{2, m+1}$, поэтому производные

$$\frac{\partial z_i}{\partial w2(l)} = \frac{\partial z_i}{\partial q_{i-1}} \frac{\partial q_{i-1}}{\partial w2(l)}, \quad i = \overline{2, m+1}. \quad (4)$$

Для функции активации в виде гиперболического тангенса производные

$$\partial z_i / \partial q_{i-1} = 0,5(1 - z_i^2), \quad i = \overline{2, m+1}. \quad (5)$$

Для вычисления производных $\partial q_{i-1} / \partial w2(l)$ представим сигналы q_i , $i = \overline{1, m}$, в виде:

$$q_i = \sum_{j=1}^N x(j) w1(i, j)$$

Здесь от коэффициента $w2(l)$ зависят сигналы обратных связей $x(r+3), x(r+4), \dots, x(N)$. Поэтому производные

$$\frac{\partial q_{i-1}}{\partial w2(l)} = \sum_{j=r+3}^N \left[\frac{\partial x(j)}{\partial w2(l)} w1(i-1, j) \right], \quad i = \overline{2, m+1}.$$

С учетом обозначений $x(r+3) = \tilde{y}_{n-1}$, $x(r+4) = \tilde{y}_{n-2}, \dots, x(N) = \tilde{y}_{n-p}$ (рис. 3) последние соотношения примут вид:

$$\frac{\partial q_{i-1}}{\partial w2(l)} = \sum_{j=1}^p \left[\frac{\partial \tilde{y}_{n-j}}{\partial w2(l)} w1(i-1, r+2+j) \right], \quad i = \overline{2, m+1}.$$

С учетом структуры сигнала $\tilde{y}_n = \alpha \hat{y}_n + (1 - \alpha) y_n$ последние соотношения примут вид:

$$\frac{\partial q_{i-1}}{\partial w2(l)} = \sum_{j=1}^p \left[\alpha \frac{\partial \hat{y}_{n-j}}{\partial w2(l)} w1(i-1, r+2+j) \right], \quad i = \overline{2, m+1}. \quad (6)$$

Таким образом, формулы (2)-(6) определяют частные производные целевой функции по коэффициентам $w2(l)$, $l = \overline{1, m+1}$. Получен характерный для рекуррентных сетей результат: производная выходного сигнала сети в данный момент времени вычисляется по ее зна-

чениям в предыдущие моменты. Начальные значения производных полагаются равными нулю.

Рассмотрим обучение нейронов первого слоя. Найдем частные производные

$$\frac{\partial E}{\partial w_l(l,s)} = -\frac{1}{N} \sum_n \varepsilon_n \frac{\partial \hat{y}_n}{\partial w_l(l,s)}. \quad (7)$$

Выходной сигнал сети представим как:

$$\hat{y}(n) = z_1(n)w_2(1) + \sum_{i=2}^{m+1} z_i(n)w_2(i),$$

имея в виду, что сигнал $z_1(n)$ не зависит от коэффициентов первого слоя. От коэффициента $w_l(l,s)$ за счет обратных связей зависят все сигналы $z_i(n)$, $i = \overline{2, m+1}$, поэтому производные

$$\frac{\partial \hat{y}(n)}{\partial w_l(l,s)} = \sum_{i=2}^{m+1} w_2(i) \frac{\partial z_i(n)}{\partial w_l(l,s)}, \quad (8)$$

Производные $\partial z_i(n)/\partial w_l(l,s)$ соответствуют структуре (4):

$$\frac{\partial z_i(n)}{\partial w_l(l,s)} = \frac{\partial z_i(n)}{\partial q_{i-1}} \frac{\partial q_{i-1}}{\partial w_l(l,s)}, \quad \partial z_i/\partial q_{i-1} = 0,5(1 - z_i^2), \quad i = \overline{2, m+1}. \quad (9)$$

Для нахождения производных $\partial q_{i-1}/\partial w_l(l,s)$ представим сигналы q_i , $i = \overline{1, m}$, в виде:

$$q_i = \sum_{j=1}^N x(j)w_l(i, j).$$

При $i - 1 = l$, то есть для нейрона, содержащего коэффициент $w_l(l,s)$, производная

$$\frac{\partial q_{i-1}}{\partial w_l(l,s)} = x(s) + \sum_{j=r+3}^N \frac{\partial x(j)}{\partial w_l(l,s)} w_l(i-1, j).$$

При $i - 1 \neq l$ производные примут вид:

$$\frac{\partial q_{i-1}}{\partial w_l(l,s)} = \sum_{j=r+3}^N \frac{\partial x(j)}{\partial w_l(l,s)} w_l(i-1, j).$$

Последние соотношения можно обобщить с помощью символа Кронекера:

$$\frac{\partial q_{i-1}}{\partial w_l(l,s)} = \delta_{i-1,l} x(s) + \sum_{j=r+3}^N \frac{\partial x(j)}{\partial w_l(l,s)} w_l(i-1, j).$$

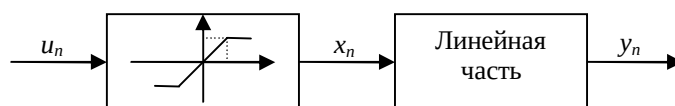
Перепишем последнее соотношение с учетом обозначений для сигналов обратных связей:

$$\frac{\partial q_{i-1}}{\partial w_l(l,s)} = \delta_{i-1,l} x(s) + \alpha \sum_{j=1}^p \frac{\partial \hat{y}(n-j)}{\partial w_l(l,s)} w_l(i-1, r+2+j). \quad (10)$$

Таким образом, формулы (7)-(10) определяют частные производные целевой функции по коэффициентам $w_l(l,s)$, $l = \overline{1, m}$, $s = \overline{1, N}$. Здесь также имеет место рекуррентный способ вычисления производной $\partial \hat{y}(n)/\partial w_l(l,s)$.

Экспериментальная часть

Экспериментальная проверка предложенного метода идентификации проведена на примере ДО, состоящего из последовательного соединения нелинейного элемента и линейного динамического звена 2-го порядка (рис. 4). Входной сигнал u_n , $n = \overline{0, N-1}$, $N = 100$, - дискретный белый шум со стандартным нормальным распределением.



$$y_n = a_1 y_{n-1} + a_2 y_{n-2} + b_0 x_n + b_1 x_{n-1} + b_2 x_{n-2}$$

Рис. 4. Структурная схема ДО

В процессе эксперимента рассмотрены 3 режима идентификации. В первом режиме параметр $\alpha = 0$; обучение проходило в режиме «усиления учителем», то есть в рекуррентные входы НС поступали задержанные значения выходного сигнала ДС y_n . Результаты эксперимента приведены на рисунке 5.

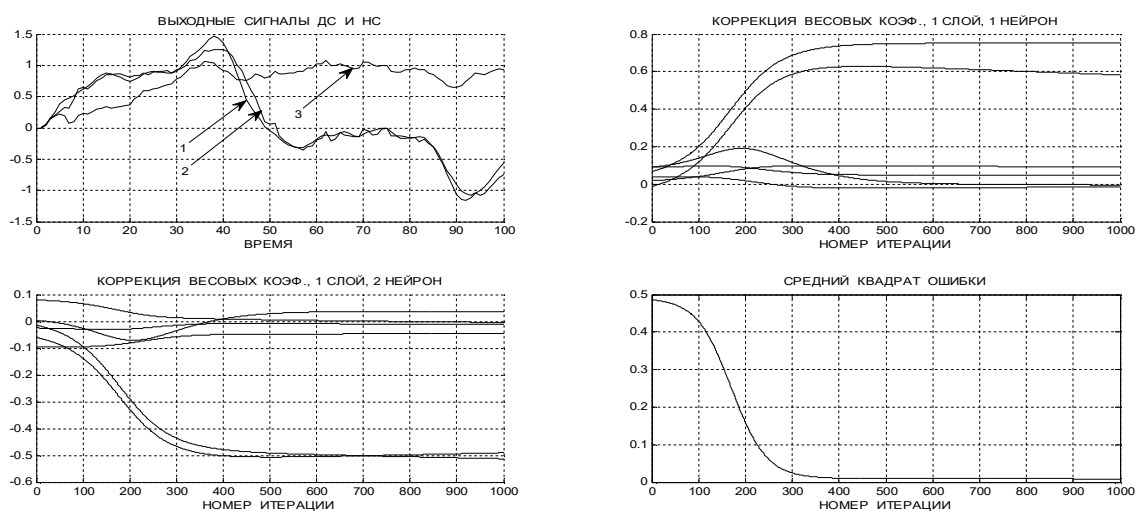


Рис. 5. Результаты эксперимента (переключатель в положении 2)

Обучение сети состоялось менее чем за 1000 эпох. На графике выходных сигналов: кривая 1 - реакция ДС на входную случайную последовательность, кривая 2 - реакция обученной НС на ту же последовательность в режиме «усиление учителем» (переключатель в положении 2), кривая 3 - реакция обученной НС на ту же последовательность в автономном режиме (переключатель переведен в положение 1). Хорошее совпадение кривых 1 и 2 создает иллюзию быстрого и качественного обучения НС. Однако перевод НС в самостоятельный режим приводит к значительным отклонениям выходных сигналов ДС и НС. НС нельзя признать качественной моделью ДС.

Во втором режиме параметр $\alpha = 1$; обучение НС проходило в классическом режиме, когда на рекуррентные входы НС поступали задержанные значения выходного сигнала НС \hat{y}_n . Результаты эксперимента приведены на рисунке 6.

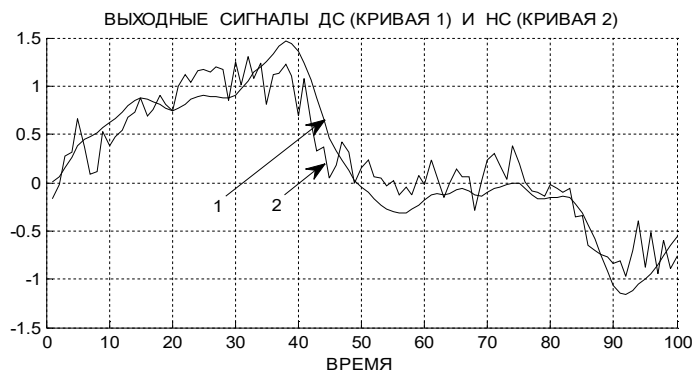


Рис. 6. Результаты эксперимента (переключатель в положении 1)

Для обучения НС потребовалось 10000 эпох. В целом выходной сигнал НС соответствует выходному сигналу ДС; отклонения между ними объясняются простейшей структурой НС, содержащей всего 2 нейрона в первом слое.

В третьем режиме параметр α изменялся от 0 до 1. Обучение НС проводилось на основании взвешенного сигнала $\tilde{y}_n = \alpha \hat{y}_n + (1 - \alpha) y_n$. Параметр α изменялся от эпохи к эпохе с шагом $1/M$, где M – общее число итераций ($M=1000$, как и в первом режиме обучения). Результаты эксперимента приведены на рисунке 7.

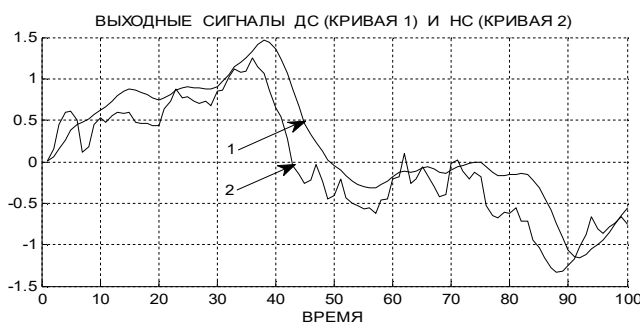


Рис. 7. Результаты эксперимента при комбинированном обучении

Эти результаты можно рассматривать как компромисс, достигнутый между первым и вторым режимами обучения: малое время обучения, характерное для первого режима, и достаточно высокая точность идентификации, присущая второму режиму.

Библиографический список

1. Narendra K.S., A. Parthasarathy. Identification and control of dynamical systems using neural networks. IEEE Transactions on Neural Networks, 1990, vol. 1, p. 4-27.
2. Кузнецов В.П. Комплексная нейронная сеть // Цифровая обработка сигналов, 2023, №3, с. 32-36.
3. Кузнецов В.П. Комплексная нейронная сеть для построения инверсной модели объекта // Сб. трудов VII Международного научно-технического форума СТНО-2024, т. 5, с. 151-157.
4. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание. : Пер. с англ. – М. : Изд. Дом «Вильямс», 2008. – 1104 с.
5. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / Пер. с польского. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 344 с.
6. Сигеру Омату, Марзуки Халид, Рубия Юсоф. Нейроуправление и его приложения. : Пер с англ. – М.: ИПРЖР, 2000. – 272 с.

УДК 004.932; ГРНТИ 28.23.15

ПРИМЕНЕНИЕ АВТОЭНКODЕРОВ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИСКАЖЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

П.Е. Жгутков

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

Аннотация. Данная работа посвящена решению проблемы восстановления искаженных изображений. В качестве решения предложено использовать сверточные автоэнкодеры. В работе проведено исследование архитектуры сверточного автоэнкодера на основе Residual-блоков с использованием сети-дискриминатора. Эффективность моделей оценивалась на искусственно зашумленных цветных изображениях. Для искусственного искажения изображений использовались модели гауссовского и спекл-шума. Для оценки качества восстановленных изображений использовались субъективные и объективные метрики. В ходе сравнительного исследования были сделаны выводы об эффективности применения автоэнкодеров в задачах восстановления качества искаженных изображений.

Ключевые слова: искаженные изображения, сверточные автоэнкодеры, Residual-блоки, сеть-дискриминатор, MSE, RMSE, PSNR, SSIM.

THE USE OF AUTOENCODERS FOR NOISY IMAGES RESTORATION

P.E. Zhgutov

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

The summary. This work is devoted to solving the problem of restoring noised images. It is proposed to use convolutional autoencoders as a solution. The paper investigates the architecture of a convolutional autoencoder based on Residual blocks using a discriminator network. The effectiveness of the models was evaluated on artificially noisy color images. Gaussian and Speckle noise models were used to artificially distort the images. Subjective and objective metrics were used to evaluate the quality of the restored images. In the course of a comparative study, conclusions were drawn about the effectiveness of using autoencoders in restoring the quality of distorted images.

Keywords: noisy image, convolutional autoencoders, Residual-block, discriminator network, MSE, RMSE, PSNR, SSIM.

Введение

В настоящее время использование искусственных нейронных сетей (ИНС) позволяет достичь высоких результатов во многих областях компьютерного зрения. Широкое распространение нейронные сети получили в задачах улучшения качества изображений. На качество изображения влияют как внешние (погодные условия, освещение), так и внутренние факторы, зависящие от конструкции фотоприемного датчика (фотоматрицы). В частности, к внутренним факторам [1], оказывающим наибольшее влияние, относят: нагрев матрицы фотоприемника, конструктив АЦП преобразователей, физические процессы, протекающие в матрице (дробовой шум, квантовые флуктуации света и т.д.). Влияние факторов в процессе формирования изображения проявляется в виде шума и визуальных искажений.

Наиболее известными подходами к решению задачи восстановления искаженных изображений являются методы и алгоритмы: вейвлет-фильтрации [2-3], преобразований Фурье [4], а также методы на основе фракталов [5] и нечеткой логики [6]. Одним из вариантов восстановления искаженных изображений является применение нейросетевых автоэнкодеров.

Автоэнкодеры – класс нейросетей без учителя, применяющихся в широком спектре задач, таких как кодирование и сжатие информации, фильтрация шума [7]. Архитектура автоэнкодера состоит из двух частей: энкодера и декодера, выполняющих функции кодирования и декодирования информации.

Результатом работы энкодера является сжатое латентное представление исходного сигнала. Основной функцией декодера является восстановление исходного сигнала из сжато-

го представления. Процесс обучения автоэнкодера заключается в сопоставлении исходного сигнала и предсказания нейросети. В качестве функции потерь обычно используют средне-квадратичную ошибку (СКО).

Для решения задач восстановления искаженных изображений в процессе обучения в качестве входных данных используется искусственно зашумленный сигнал, в котором модель шума подбирается исходя из поставленной задачи. В качестве исследуемого алгоритма был выбран сверточный автоэнкодер [8] с использованием сети дискриминатора.

Архитектура исследуемого автоэнкодера

Основным отличием сверточных автоэнкодеров является процесс сжатия и восстановления информации, который основан на операциях свертки.

Сжатие в энкодере достигается последовательной операцией свертки входного изображения. Для извлечения важных признаков из входного сигнала используются блоки свертки 3×3 . Для формирования скрытого представления в качестве полносвязного слоя используется блок свертки 1×1 . Полученное скрытое представление подается на вход декодера, где происходит восстановление данных с помощью блоков обратной свертки. Восстановление изображения осуществляется за счет блока свертки 3×3 , количество фильтров в котором равно количеству цветовых каналов исходного изображения. В блоках последовательной свертки применяется функция активации swish. Выходной слой декодера в качестве функции активации применяет сигмоидальную функцию. Структура стандартного сверточного автоэнкодера представлена на рисунке 1.

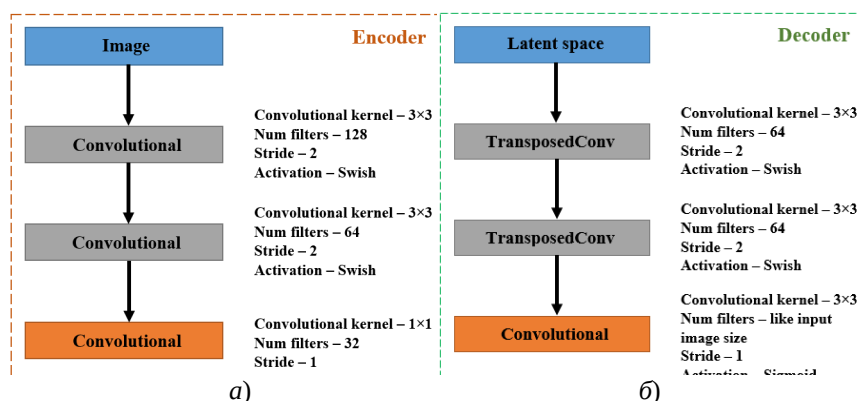


Рис. 1. Архитектура стандартной модели автоэнкодера: а) – структура энкодера; б) – структура декодера

В исследуемой модели автоэнкодера функция сжатия и восстановления изображения выполнены на основе Residual-блоков [9], основной функцией которых является увеличение обобщающей способности модели за счет прореживания и выбора наиболее важных признаков (эффект бутылочного горлышка). Помимо выполнения основной функции, блок позволяет дополнить информацию, полученную от предыдущего слоя сети, с помощью Skip pass – соединения. Данная особенность Residual-блоков позволяет избежать создания новых признаков, что предотвращает переполнение признакового пространства и увеличивает эффективность модели. В данной работе применялось два варианта блоков: в стандартном исполнении для сжатия изображения; с применением операции Upscaling для восстановления сжатого признакового пространства к размеру исходного изображения. Структура используемых Residual-блоков представлена на рисунке 2.

Использование Residual-блоков для сжатия и восстановления информации позволяет нейросети лучше «проанализировать» признаковое пространство, полученное в результате свертки. Структурная схема исследуемого автоэнкодера представлена на рисунке 3.

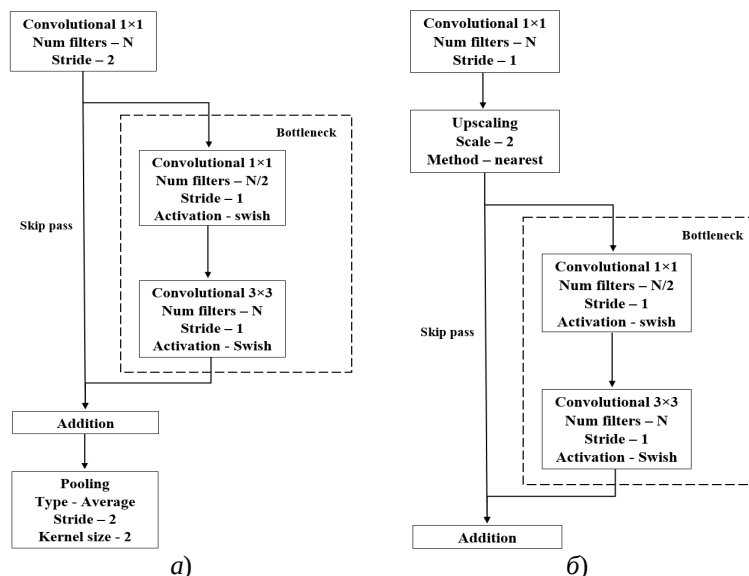


Рис. 2. Структура Residual-блоков, применяемых в работе: а) – Residual-блок, применяемый для сжатия изображения; б) – Residual-блок, применяемый для восстановления изображения из скрытого пространства

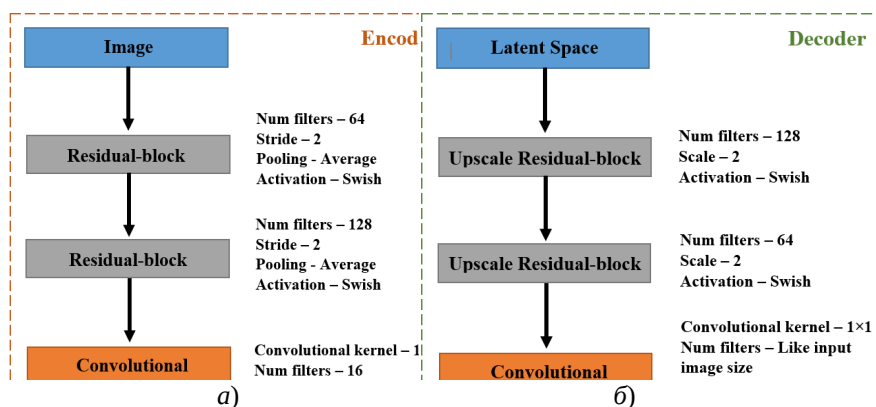


Рис. 3. Архитектура исследуемой модели автоэнкодера: а) – структура энкодера; б) – структура декодера

Однако основным недостатком автоэнкодеров является частичная потеря информации, вызванная сжатием исходного сигнала. Применительно к задаче восстановления искаженных изображений данная проблема становится еще более критичной, т.к. изначально изображение подвергнуто воздействию шума. Одним из вариантов решения данной проблемы является использование технологий генеративно-состязательных сетей (GAN) [10]. Поскольку процесс декодирования информации из латентного представления аналогичен генерации нового изображения по определенным входным данным, то использование дополнительной нейросети-дискриминатора позволяет увеличить качество восстановленного изображения.

Основной функцией дискриминатора является определение качества искусственно-сгенерированных изображений. Результаты его работы используются для вычисления функции потерь в момент обучения автоэнкодера. Важным преимуществом данной архитектуры является повышение эффективности нейросети без увеличения размеров модели, т.к. в процессе практического применения автоэнкодера сеть дискриминатор не используется. Структура дискриминатора состоит из сверточной сети на основе Residual-блоков. На выходе сети расположен полносвязный слой, преобразующий многомерное признаковое пространство, полученное из входного изображения, в коэффициент, определяющий насколько изображение реалистично. Для увеличения эффективности модели в структуру дискриминатора был добавлен слой Dropout с вероятностью обнуления коэффициентов в 30%. Структурная схема модели дискриминатора представлена на рисунке 4.

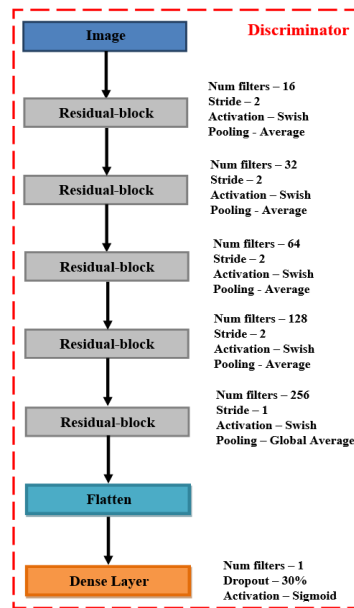


Рис. 4. Архитектура сети дискриминатора

Функция потерь исследуемого автоэнкодера

Немаловажным этапом обучения автоэнкодера является выбор функции потерь. Обычно в процессе обучения автоэнкодера в качестве функции потерь используется средне-квадратичная ошибка (MSE) [11]. Вычисление MSE в задачах восстановления изображений выполняется по следующей формуле

$$MSE = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=1}^n (\hat{X}_i - X_i)^2, \quad (1)$$

где m – количество всех пикселей на изображении;

n – количество изображений в одном обучающем батче;

\hat{X}_i – изображение, полученное в результате работы сети;

X_i – исходное изображение без добавленного шума.

MSE является универсальной функцией потерь, однако в задачах восстановления искаженных изображений наиболее важным является сохранение визуального качества и структуры изображения, что сложно достигнуть, используя MSE.

Более эффективным методом оценки качества восстановленного изображения является вычисление индекса структурного сходства (SSIM) [12]. При вычислении данной метрики учитывается влияние яркости, контрастности и структуры изображения, а также взаимосвязь соседствующих пикселей. Вычисление SSIM происходит на основе следующих выражений [13]:

$$SSIM = \frac{2M(X)M(\hat{X}) + c_1}{M^2(X) + M^2(\hat{X}) + c_1} \cdot \frac{2\sigma_{X\hat{X}} + c_2}{\sigma_X^2 + \sigma_{\hat{X}}^2 + c_2}, \quad (2)$$

где $M(\hat{X})$, $M(X)$, $\sigma_{\hat{X}}$, σ_X – математические ожидания и дисперсии яркости от предсказанного и исходного изображений, соответственно, c_1 и c_2 – коэффициенты, равные:

$$c_1 = (k_1 L)^2, c_2 = (k_2 L)^2, \quad (3)$$

где $k_1 = 0,01$, $k_2 = 0,03$, L – динамический диапазон яркостей изображения (в данной работе использовались 32-битные изображения), $\sigma_{X\hat{X}}$ – ковариация исходного и предсказанного изображений, вычисляемая по формуле:

$$\sigma_{X\hat{X}} = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (X(i, j) - M(X))(\hat{X}(i, j) - M(\hat{X})). \quad (4)$$

Для увеличения эффективности обучения автоэнкодеров в рамках данной работы предлагается вычислять функцию потерь на основе SSIM. В силу специфики SSIM вычисление функции потерь для цветного изображения требует определения значения SSIM по каждому цветовому каналу изображения.

В данной работе вычисление функции потерь на основе SSIM для первых двух моделей автоэнкодера выполнялось по следующим формулам:

$$r = SSIM(R_{\hat{X}}, R_X); g = SSIM(G_{\hat{X}}, G_X); b = SSIM(B_{\hat{X}}, B_X);$$

$$loss = \left| \frac{1}{3}(r + g + b) - 1 \right|, \quad (5)$$

где $R_X, R_{\hat{X}}, G_X, G_{\hat{X}}, B_X, B_{\hat{X}}$ – цветовые каналы исходного и предсказанного изображений.

Для обучения модели с дискриминатором функция потерь вычисляется на основе SSIM и результатов работы дискриминатора по следующей формуле:

$$loss = \left| \frac{1}{3}(r + g + b) - 1 \right| + dmCoeff, \quad (6)$$

где $dmCoeff$ – коэффициент качества восстанавливаемого изображения, вычисляемый как

$$dmCoeff = binarycrossentropy(Z, 1), \quad (7)$$

где Z – коэффициент реалистичности, полученный в результате обработки предсказанного изображения \hat{X} .

Процесс обучения дискриминатора происходит параллельно обучению всей модели. Для обучения дискриминатора используется собственная функция потерь, не зависящая от результатов работы автоэнкодера. Функция потерь дискриминатора вычисляется по формуле:

$$loss = binarycrossentropy(Z, 0) + binarycrossentropy(Y, 1), \quad (8)$$

где Y – коэффициент реалистичности, полученный в результате обработки исходного изображения X .

Обучение автоэнкодеров

Обучение исследуемого автоэнкодера проводилось с использованием данных без эталонной разметки. В рамках данной работы использовались цветные изображения из пользовательского набора данных Pascal VOC [14]. Размер изображений, используемых для обучения автоэнкодеров, составил 240×240 пикселей.

Для создания искаженных изображений использовалась модель аддитивного белого гаусовского шума с нулевым средним и значением дисперсии 0,01, а также модель мультипликативного спекл-шума. Размер набора данных составил порядка 8000 изображений, из ко-

торых 80% составили тренировочную, 10% валидную, 10% тестовую выборки. Примеры исходных и искаженных изображений приведены на рисунке 5.

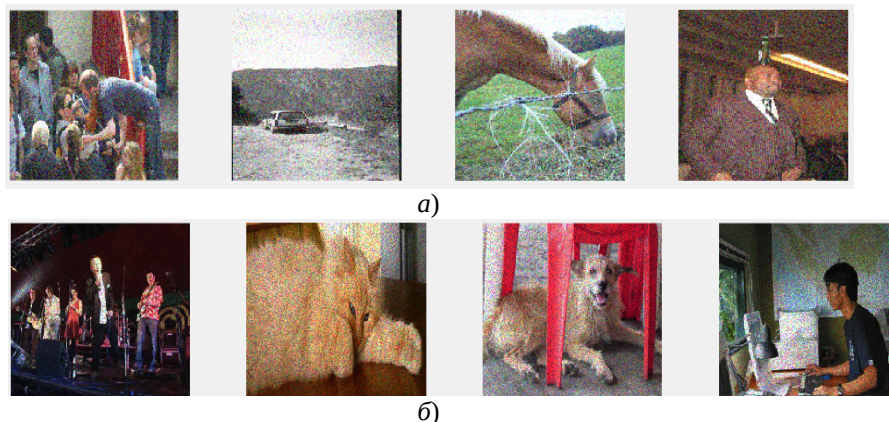


Рис. 5. Примеры изображений, используемых в процессе обучения:
а) – изображения, искаженные гауссовским шумом; б) – изображения, искаженные спекл-шумом

Разработка и обучение модели производились в программной среде MATLAB. Модель обучалась в течении 30 эпох с использованием функции кросс-валидации. В процессе обучения автоэнкодера вычислялось значение функции потерь на валидном наборе данных. На основе вычисленных данных был построен график зависимости функции потерь от длительности обучения (количества итераций). Полученный график представлен на рисунке 6.

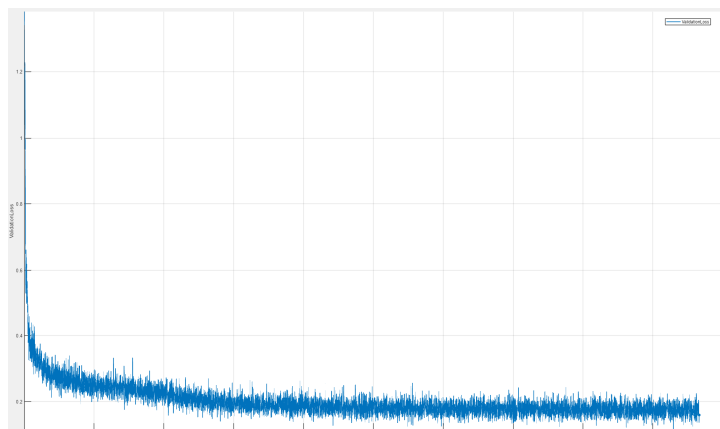


Рис. 6. График зависимости значения функции потерь от продолжительности обучения

Обработка результатов

Оценка эффективности обученного автоэнкодера производилась на тестовом наборе данных, не участвовавшем в процессе обучения. Качество восстановленных изображений оценивалось с помощью визуальной оценки. В результате анализа обработанных изображений были сделаны выводы, что исследуемый автоэнкодер способен отфильтровать как гауссовский, так и спекл-шум. Примеры восстановленных изображений приведены на рисунке 7.



Рис. 7. Примеры работы исследуемого автоэнкодера:

- а) – изображения, искаженные с помощью гауссовского шума; б) – восстановленные изображения;
в) – изображения, искаженные с помощью спекл-шума; г) – восстановленные изображения

Для объективной оценки качества восстановленных изображений использовались стандартные метрики: корень среднеквадратичной ошибки (RMSE), пиковое отношение сигнал/шум (PSNR), значение индекса структурного сходства (SSIM). Значения метрик вычислялись отдельно по разным типам шума. Средние значения метрик, полученные при обработке тестового набора данных, были сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Результаты тестирования исследуемого автоэнкодера

	Метрики		
	RMSE	PSNR, дБ	SSIM
<i>Аддитивный гауссовский шум</i>			
Зашумленное изображение	$1,2688 \cdot 10^{-5}$	17,3625	0,8202
Исследуемый автоэнкодер	$1,4298 \cdot 10^{-6}$	27,3479	0,9500
<i>Спекл-шум</i>			
Зашумленное изображение	$7,4872 \cdot 10^{-6}$	19,9839	0,8437
Исследуемый автоэнкодер	$1.6451 \cdot 10^{-6}$	26,8099	0,9506

На основе результатов исследования был сделан вывод, что использование автоэнкодеров с дополнительной сетью дискриминатором позволяет эффективно решать задачу восстановления искаженных изображений.

Библиографический список

1. Katsuhiko Ogata Modern Control Engineering. Fifth Edition, Prentice Hall, 2010. 905 с.

2. Бехтин Ю.С. Обработка зашумленных изображений на основе вейвлет-преобразований // Вестник Рязанской государственной радиотехнической академии, 2006, № 18. - с. 141-143.
3. Бехтин Ю.С., Брянцев А. А. Предварительная текстурная сегментация при сжатии зашумленных данных изображений на основе вейвлет-преобразований // Вестник Рязанской государственной радиотехнической академии, 2006, № 19. с. 45-50.
4. Римских М. В. Методы преобразования Фурье и квадратур с регуляризацией для восстановления смазанных изображений в matlabе // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2008. – №. 47. – С. 39-51.
5. Привезенцев Д. Г., Жизняков А. Л., Баранов А. А. Применение фрактальных методов в обработке изображений и сигналов // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. – 2009. – №. 14. – С. 133-141.
6. Гридин В. Н., Бугаенко Е. И. Метод автоматического формирования панорамных изображений на основе аппарата нечеткой логики // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2009. – Т. 52. – №. 2. – С. 7-11.
7. Bank D., Koenigstein N., Giryas R. Autoencoders // Machine learning for data science handbook: data mining and knowledge discovery handbook. – 2023. – С. 353-374.
8. Zhang Y. A better autoencoder for image: Convolutional autoencoder // ICONIP17-DCEC. Available online: <http://users.cecs.anu.edu.au/Tom> (accessed on 23 March 2017). – 2018.
9. He K. et al. Deep residual learning for image recognition // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. – 2016. – С. 770-778.
10. Goodfellow I. et al. Generative adversarial networks // Communications of the ACM. – 2020. – Т. 63. – №. 11. – С. 139-144.
11. Seghouane A. K. A note on image restoration using C_p and MSE // IEEE signal Processing Letters. – 2008. – Т. 15. – С. 61-64.
12. Hassan M., Bhagvati C. Structural similarity measure for color images // International Journal of Computer Applications. – 2012. – Т. 43. – №. 14. – С. 7-12.
13. Инсаров В. В., Тихонова С. В., Михайлов И. И. Проблемы построения систем технического зрения, использующих комплексирование информационных каналов различных спектральных диапазонов // Информационные технологии. – 2014. – №. S3. – С. 1-32.
14. Pascal-VOC2012: официальный сайт Kaggle. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/gopalbhattra/pascal-voc-2012-dataset> (дата обращения 17.02.2025).

УДК 621.396; ГРНТИ 47.47

МОДЕЛЬ ИСКАЖЕНИЙ ЦИФРОВОГО СИГНАЛА, ПРИМЕНИМАЯ ДЛЯ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ ПОТОКОВОЙ ВИДЕОИНФОРМАЦИИ

М.Ю. Звездочкин

*Филиал АО «РКЦ «Прогресс» - ОКБ «Спектр»,
Российская Федерация, Рязань, pub@zvyozdochkin.ru*

Аннотация. В работе предложена модель искажений цифрового видеосигнала, основанная на внесении в натуральный видеосигнал ошибок трёх видов псевдослучайного характера. Определены характеристики, описывающие каждый вид ошибки. Предложена алгоритмическая реализация описанной модели.

Ключевые слова: видеосигнал, потоковое видео.

DIGITAL SIGNAL DISTORTION MODEL FOR VIDEO STREAMING PROCESSING SYSTEMS

M.Y.Zvyozdochkin

*Joint Stock company Space Rocket Centre Progress - SDB «Spectr»,
Russia, Ryazan, pub@zvyozdochkin.ru*

The summary. This paper proposes a model of digital video signal distortions based on introducing three types of pseudo-random errors into a natural video signal. Characteristics describing each type of error are defined. An algorithmic implementation of the described model is proposed.

Keywords: video signal, video streaming.

Модели, обсуждаемые в статье, необходимы для проверки устойчивого функционирования систем передачи и обработки потоковой видеoinформации по каналам пониженной надёжности, в частности:

- 1) передача цифрового сигнала по радиоэффиру;
- 2) передача по распределённым вычислительным сетям с применением протоколов без гарантии доставки (на базе протокола UDP).

Область применения рассматриваемых моделей

При передаче цифрового видеосигнала даже единичные его искажения могут привести к чувствительным потерям информации. В частности:

- 1) для кодеков с применением ключевых кадров [1] искажение в ключевом кадре может повлечь за собой потерю или артефакты во всей группе кадров (group of frames, GoP), длина которой часто составляет 15-30 кадров;
- 2) для видеопотока с переменной частотой кадров при передаче кадров, сопровождаемых временными метками, искажение временной метки может привести к неверному вычислению межкадрового интервала, что в свою очередь может повлечь за собой либо длительный перерыв в передаче (отображении) видеопотока и даже полное её прекращение [2].

Системы обработки, передачи и отображения видеoinформации, для которых актуальны подобные проблемы, должны предусматривать исправление искажений либо минимизацию их последствий. Для испытания таких систем могут использоваться либо реальные искажённые сигналы, либо их модели.

Известные модели

В литературе описан ряд моделей искажений цифровых сигналов. Безусловного внимания заслуживают модели искажений цифровых сигналов при их распространении в природных средах, предложенные в [3-5].

В частности, в [3] исследуются искажения комплексных огибающих рассматриваемых сигналов. При этом среда распространения представляется в виде линейного фильтра, характеризуемого комплексным коэффициентом передачи:

$$\dot{H}(f) = \exp(j2\pi f \tau(f)), \quad (1)$$

где τ – относительное время распространения радиоволны до приемника

$$\tau(z, f) = \int_0^z dx / c_\phi; \quad (2)$$

c_ϕ – фазовая скорость, которая зависит от неоднородной диэлектрической проницаемости среды $\epsilon(z, f)$.

При этом диэлектрическая проницаемость среды является отдельным объектом моделирования. Так, для земной ионосферы спутниковых радиолиний она зависит от собственной частоты ионосферы и электронной плотности ионосферы на заданной высоте. В свою очередь, для электронной плотности ионосферы существует ряд моделей. Для среды с туманом коэффициент относительной эффективной диэлектрической проницаемости зависит от влажности среды. Наконец, в [5] даётся описание модели диэлектрической проницаемости для лесных массивов. Модель позволяет оценивать энергетические бюджеты радиолиний распространения сигналов с расширением их полосы в лесных массивах.

Упомянутые модели важны и ценны при проектировании радиолиний, приёмных и передающих средств. Если же говорить о разработке и испытаниях программных средств обработки цифрового видеосигнала, нам представляется целесообразным отталкиваться от ха-

рактических уже искажённого сигнала (частота искажений, длина искажённого участка). Как и в указанных выше работах, внесение искажений представляет собой случайный процесс.

Предлагаемая модель

Цифровой видеосигнал, на который накладываются искажения, представляет собой последовательность N кадров с переменной частотой. В видеопотоке может применяться помехоустойчивое кодирование (систематический код Рида-Соломона). Несколько блоков кода Рида-Соломона образуют цикл длиной N_c информационных слов.

В нашей модели сигнал подвергается искажениям трёх видов:

- одиночные ошибки (меняется значение отдельных битов);
- прерывистые групповые ошибки (искажаются длительные фрагменты видеопотока, при этом в искажённой части меняется только часть битов);
- непрерывные групповые ошибки (искажаются длительные фрагменты видеопотока, при этом фрагменты заполняются случайными значениями).

Характеристикой первого вида искажений является вероятность искажения отдельного бита P_s .

Значимость групповых ошибок определяется, в частности тем, что при применении кода Рида-Соломона они способны исказить несколько подряд идущих кодируемых блоков. Характеристики второго вида искажений:

- P_g - вероятность искажения цикла;
- N_g – максимальная длина искажаемой части в информационных словах;
- P_{sg} - вероятность искажения бита в искажаемой части цикла (P_{sg} значительно выше P_s).

Для третьего вида искажений характеристики те же, что и для второго, за исключением P_{sg} (она неактуальна, так как фрагмент заменяется целиком).

Реализация модели

В качестве исходных данных для модели выступает натурный видеопоток без искажений видеоинформации. Для каждого цикла проводится наложение как одиночных, так и групповых (обоих видов) ошибок.

Для одиночных ошибок:

- по формуле Бернулли на основании выбранного значения P_s находятся вероятности P_{sr} передачи информационного слова с r искажениями ($r=0..3$). Случай $r>3$ приближается к групповым ошибкам, соответственно, далее мы его не рассматриваем;

- для каждого информационного слова в потоке сначала определяется количество искажённых бит r_w вызовом генератора случайных чисел (ГСЧ) с равномерным распределением и сравнением полученного значения с элементами массива P_{sr} . После этого выбираются искажаемые биты в слове r_w -кратным вызовом ГСЧ. Значения выбранных битов инвертируются.

Для прерывистых групповых ошибок:

- для каждого цикла на основании значения P_g определяется, есть ли в нём искажённый фрагмент;

- определяется длина искажённой части N_w в информационных словах в диапазоне $1..N_g$;

- определяется номер первого слова искажённой части N_0 в диапазоне $0..(N_c - N_w)$;

- для каждого бита каждого информационного слова в искажаемой части производится оценка необходимости искажения каждого бита, исходя из значения P_{sg} , в случае положительного решения бит инвертируется.

Для непрерывных групповых ошибок:

- для каждого цикла на основании значения P_g определяется, есть ли в нём искажённый фрагмент;
- определяется длина искажённой части N_w в информационных словах в диапазоне $1..N_g$;
- определяется номер первого слова искажённой части N_0 в диапазоне $0...(N_c - N_w)$;
- слова в диапазоне $N_0...(N_0 + N_w)$ заменяются на произвольные, полученные из ГСЧ.

Пути развития модели и направления в целом

1. При написании программной реализации описанной модели следует иметь в виду, что второй и третий вид накладываемых ошибок в значительной степени являются взаимозаменяемыми. Второй вид (прерывистые групповые ошибки) требует для своей реализации значительно больших вычислительных ресурсов, чем третий. Однако он в ряде случаев способен дать результаты, более приближенные к реальным помехам. Целесообразность его применения требует отдельного исследования.

2. Представляется интересным и перспективным в системах обработки информации, в том числе в системах обработки потоковой видеоинформации, в том числе при создании систем искусственного интеллекта, создавать надежные системы обработки из ненадежных элементов на основе новых алгебр логики [6 – 11].

Библиографический список

1. Angelides, M. C. Editorial: Working with Multimedia Standards: MPEG-7, MPEG-21 and H.264 / M. C. Angelides // Computer Journal. – 2005. – Vol. 48, No. 5. – P. 502.
2. Звездочкин, М. Ю., Миронов В.В. Управление буферизацией видеоинформации, декодированной из циклических структур / М. Ю. Звездочкин, В. В. Миронов // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2024. – № 2. – С. 143-153. – DOI 10.31857/S0002338824020124.
3. Назаров, Л. Е. Модели искажений цифровых сигналов при распространении в природных средах спутниковых радиолоний / Л. Е. Назаров // Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации : Труды XVI Международной научно-технической конференции, Суздаль, 09–12 октября 2023 года. – Москва: Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, 2023. – С. 45-48.
4. Назаров, Л. Е. Модели искажений цифровых сигналов при распространении по анизотропным трансферным радиолониям / Л. Е. Назаров, В. В. Батанов // Материалы 21-й Международной конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", Москва, 13–17 ноября 2023 года. – Москва: Институт космических исследований Российской академии наук, 2023. – С. 319.
5. Назаров, Л. Е. Модели искажений сигналов при распространении в лесных массивах / Л. Е. Назаров // Журнал радиоэлектроники. – 2022. – № 2.
6. Тарасов В.В. К синтезу надежных схем из ненадежных элементов // Математические заметки. – 1976. – Т. 20. - № 3. – С. 391 – 400.
7. Миронов В. В. , Федосова Е.Б. Применение алгебры логики в моделях технических систем: история и современность // Вопросы истории естествознания и техники. – 2022. – Т. 43. – С. 328-349
8. Миронов В.В. Новые алгебры логики на индексированных логических множествах. // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2022 [текст]: сб. тр. V междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.5./ – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2022. С. 29 – 43..
9. Миронов В.В. Новые некоммутативные алгебры логики. // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2022 [текст]: сб. тр. V междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.5./ – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2022. С. 43 – 54.
10. 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: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2022. С. 54 – 69.
11. Миронов В.В. Конечные, конечномерные и конечнопорожденные абелевы алгебры логики. // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2022 [текст]: сб. тр. V междунар. науч.-техн. форума: в 10 т. Т.5./ – Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2022. С. 69 – 76.

УДК 004.62; ГРНТИ 49.03.05

ВТОРИЧНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ С БЫСТРОМЕНЯЮЩИМИСЯ ПАРАМЕТРАМИ: ЗАДАЧИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В.Ю. Ерохин

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, vladisvaw_avg2000@mail.ru*

Аннотация. В работе рассмотрена проблема обработки быстроменяющихся параметров, а также их роль при испытаниях и пусках ракетоносителей. Быстроменяющиеся параметры являются важной составляющей телеметрической информации, в частности при оценке таких характеристик, как виброустойчивость, вибропрочность и вибростойкость. Важно уделить внимание передаче достоверной телеметрической информации, поскольку это позволит не только обнаружить нештатную ситуацию, но и выявить причину её возникновения. Научно важным вопросом является правильная расстановка вибрационных и акустических датчиков. Для обработки быстроменяющихся параметров требуется разработка специального программного обеспечения: как удобного в применении, так и более дешевого в сравнении с известными аналогами.

Ключевые слова: быстроменяющиеся параметры, виброустойчивость, вибропрочность, вибростойкость, оценка параметров.

SECONDARY PROCESSING OF SIGNALS WITH RAPIDLY CHANGING PARAMETERS: PROSPECTIVE RESEARCH TASKS

V.Yu. Erohin

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, vladisvaw_avg2000@mail.ru*

The summary. The paper considers the problem of processing rapidly changing parameters, as well as their role in testing and launch vehicles. Rapidly changing parameters are an important component of telemetry information, in particular when evaluating characteristics such as vibration resistance. It is important to pay attention to the transmission of reliable telemetry information, as this will not only detect an emergency, but also identify the cause of its occurrence. The correct placement of vibration and acoustic sensors is a high-tech issue. To process rapidly changing parameters, it is necessary to develop special software: both user-friendly and cheaper in comparison with known analogues.

Keywords: Rapidly changing parameters, vibration resistance, parameter estimation.

Современная практика создания систем телеметрического контроля практически не предусматривает средства вторичной обработки быстроменяющихся параметров (БМП). Особенностью БМП является то, что при анализе интерес вызывает не сам параметр, а его частотные или статистические характеристики, отсюда возникает необходимость разработки отдельного программно-математического обеспечения.

Конечная цель обработки и анализа БМП – оценка виброустойчивости, вибропрочности и вибростойкости конструкции изделия на основе проводимых телеизмерений при натурных испытаниях с высокой частотой опроса. Вкратце виброустойчивость – это сохранение работоспособности конструкции в пределах интервала воздействия, вибропрочность – после воздействия, а вибростойкость – и в процессе, и после. Ударным воздействием может являться включение двигательной установки или отделение отделяющейся части конструкции (сход ступени, сброс головного обтекателя) – т.е. события, где работают пиросредства.

Роль БМП как вибрационных измерений двоякая:

- во-первых, это проверка корректности принятых решений при проектировании конструкции изделия и отработка амплитудно-частотных значений в натурных условиях испытаний (не было ли разрушительных эффектов резонанса и т.п.);

- во-вторых, на ряд бортовых датчиков возлагается диагностическая роль на случай нештатных ситуаций, это помощь в анализе их возможных причин наряду с обычными датчиками медленно меняющихся параметров.

При трансляции информации с борта ракетоносителя (РН) и разгонного блока (РБ) имеется два обстоятельства, затрудняющих получение достоверной информации:

- потеря радиосвязи в некоторые моменты разделения ступеней;
- резкое сокращение пропускной способности радиоканалов во время полета РБ, которое в начале, в лучшем случае достигает нескольких сот кбит, а к моменту отделения объекта с носителем пропускная способность сокращается до нескольких десятков кбит.

Ситуация усложняется при возникновении нештатной ситуации, когда необходимо не только принять срочные меры по её устранению, но и передать на землю максимально возможное количество достоверно измеренной информации для дальнейшего анализа и устранения причин нештатной ситуации.

В последнее время произошло резкое увеличение числа измеряемых вибропараметров, которые необходимо передавать на землю. При этом возможностей расширенного канала недостаточно, особенно на большой высоте. В связи с этим вновь возникла необходимость в обработке вибрационных параметров на борту изделия.

После математического и физического моделирования конструкции и наземных отработок на ударные воздействия разрабатывается измерительная схема установки вибрационных и акустических датчиков с учетом определяемых ближних полей и интерференционных свойств волновых процессов.

Кроме того, при стендовых испытаниях изделия снимается всеобъемлющая амплитудно-частотная характеристика конструкции для использования в дальнейшем при расчете состояния на основе точечных натуральных виброизмерений при пуске. Здесь же определяют, где рационально расставлять датчики виброускорений (они не должны попадать в узлы формирующихся стоячих волн на конструкции). Необходимо заметить, задача усугубляется неоднородностью конструкции – изделие не является сплошным телом, и каждая ступень должна рассматриваться как самостоятельный объект.

Обобщённо можно выделить четыре класса БМП, отличающихся друг от друга требованиями ко вторичной обработке и техникой анализа:

- 1) виброударные. К ним относят процессы, воздействие которых несопоставимо короче интервала реакции на него. Обусловлены кратковременным воздействием пиротехнических средств при старте и сбросе элементов конструкции. Инструмент их анализа – ударный спектр и спектральная плотность амплитуд;
- 2) вибрационные. Квазистационарные достаточно длительные вибрации, близкие к эргодическим процессам и обусловленные аэродинамическим напором. Востребованные инструменты по ним – спектр Фурье, спектральная плотность мощности и автокорреляционная функция;
- 3) процессы акустического давления. Нестационарные процессы в акустическом спектре внутри конструкции (например, в отсеке БАСУ на шпангоутах), возникающие в результате возбуждения внешних оболочек. Для оценки акустики рассматривают среднеквадратические значения амплитуд гармоник на третьоктавных полосах частот в логарифмической шкале;
- 4) процессы «виброгорения», возникающих при запуске и работе твердотопливного ракетного двигателя. Это нестационарные волновые процессы в замкнутом пространстве камеры двигателя, по характеристикам напоминающие пульсацию (биения). БМП виброгорения рассматриваются как графики поверхностей в аксонометрии «амплитуда – время – частота», также к ним применяют вейвлет-анализ.

Первые три вида определяют расчётные модели конструкции, а виброгорение является «факультативным направлением», по которому научные исследования находятся в процессе развития, и единого научного взгляда на проблематику виброгорения пока не принято.

Область обработки БМП полна не решенных до конца задач, таких как:

- разрешение по амплитуде, частоте и времени сигналов при их наложении при помощи амплитудно-частотного-временного анализа;
- выявление связи между измеряемыми процессами (характеристиками): ударные процессы, квазистационарные процессы, акустические процессы, процесс виброгорения; прослеживание связей во времени с прогнозом;
- сравнение измеренных характеристик с имеющимися аналитическими характеристиками динамических моделей разных узлов посредством корреляционного анализа;
- оптимизация процесса контроля по совокупности измеряемых и передаваемых по линии связи параметров с учетом текущих состояний бортовых и линии связи; разработка протокола действий в разных ситуациях;

Таким образом, обработка БМП является перспективным и наукоемким вопросом, требующим разработки специального комплекса программ: как удобных в применении, так и более дешевых в сравнении с известными.

Библиографический список

1. Пальмов В.А. Колебания упруго-пластических тел. – М.: Наука, 1976.
2. Найфе А. Введение в методы возмущений. – М.: Мир, 1984.
3. Гольденвейзер А.Л., Лидский Б.Б., Товстик П.Е. Свободные колебания тонких упругих оболочек. – М.: Наука, 1979.
4. Власов В.З. Общая теория оболочек: Избранные тр. – М.: АН СССР, 1962. – Т.1.
5. Вибрации в технике. Т.1.: Колебания линейных систем/ Под ред. В.В.Болотина: Справочник. – М.: Машиностроение, 1978.
6. Уоткинс, Клэри. Вибрационные характеристики тонкостенных усеченных конических оболочек // Ракетная техника и космонавтика. – 1964. – Т.2, № 10.

СЕКЦИЯ «ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ»

УДК 519.67; ГРНТИ 29.03.23

**РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА К-СРЕДНИХ В ЗАДАЧЕ КЛАССИФИКАЦИИ
ОБЪЕКТОВ ПОТРЕБИТЕЛЬСКОЙ СРЕДЫ
В НЕОПРЕДЕЛЁННЫХ УСЛОВИЯХ****Е.А. Гущина, В.Л. Бурковский***Воронежский государственный технический университет,
Российская федерация, Воронеж, serdechnaya.evgeniya@mail.ru*

Аннотация. В статье рассматривается применение метода k-средних для классификации объектов потребительской среды в условиях неопределенности. Авторы анализируют алгоритм как способ обработки данных потребительского поведения, несмотря на шумы и недостатки. Описываются этапы предобработки, выбор числа кластеров и оценка результатов. Эксперименты показывают, что метод k-средних эффективно работает в условиях неопределенности, открывая новые возможности для анализа потребительских предпочтений и подчеркивая важность адаптации алгоритмов к реальным сценариям.

Ключевые слова: метод k-средних, классификация, потребительская среда, неопределенность, машинное обучение, анализ данных, кластеризация.

**IMPLEMENTATION OF THE K-MEANS ALGORITHM
IN THE CLASSIFICATION OF CONSUMER ENVIRONMENT OBJECTS
UNDER UNCERTAIN CONDITIONS****E.A. Gushchina, V.L. Burkovsky***Voronezh State Technical University,
Russian Federation, Voronezh, serdechnaya.evgeniya@mail.ru*

Abstract. This paper examines the application of the k-means algorithm for classifying consumer environment objects under uncertainty. The authors analyze the algorithm as a method for processing consumer behavior data, despite noise and data imperfections. The stages of preprocessing, cluster number selection, and result evaluation are described. Experiments demonstrate that the k-means method performs effectively under uncertain conditions, revealing new opportunities for analyzing consumer preferences and emphasizing the importance of adapting algorithms to real-world scenarios.

Keywords: k-means algorithm, classification, consumer environment, uncertainty, machine learning, data analysis, clustering.

Математическая постановка задачи

Метод k-средних решает задачу кластеризации данных с помощью минимизации внутриклассовой дисперсии. Пусть имеется набор объектов $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, где каждый объект x_i является вектором признаков. Задача метода заключается в разделении этих объектов на k кластеров C_1, C_2, \dots, C_k таким образом, чтобы внутрикластерная дисперсия была минимальной, а межкластерное расстояние – минимальным.

1. Инициализация центроидов

Алгоритм начинается с выбора случайных центроидов для каждого из k кластеров. Центроид μ_j кластера C_j для $j = 1, 2, \dots, k$ – это среднее значение всех точек в этом кластере:

$$\mu_j = \frac{1}{|C_j|} \sum_{x_i \in C_j} x_i, \quad (1)$$

где $|C_j|$ – количество элементов в кластере C_j , а x_i – объекты, принадлежащие кластеру.

2. Распределение объектов по кластерам

Каждый объект x_i присваивается кластеру, центроид которого минимизирует расстояние до объекта. Стандартным методом для вычисления расстояний является евклидово расстояние:

$$d(x_i, \mu_j) = \sqrt{\sum_{l=1}^m (x_{il} - \mu_{jl})^2}, \quad (2)$$

где x_{il} и μ_{jl} – компоненты вектора признаков объекта x_i и центроида μ_j , соответственно, и m – количество признаков.

После этого объект x_i , будет присвоен кластеру, для которого:

$$j^* = \arg \min_j d(x_i, \mu_j). \quad (3)$$

3. Обновление центроидов

После распределения объектов по кластерам, пересчитываются новые центроиды (1). Этот процесс повторяется до тех пор, пока изменение в центроидах не станет минимальным или не будет достигнут заранее заданный порог итераций.

4. Проверка сходимости: процесс повторяется до тех пор, пока центроиды не перестанут изменяться, или до достижения заранее заданного числа итераций.

Применение метода k – средних для анализа закупок лекарств

1. Сегментация клиентов аптек

Одной из важнейших задач в аптечном бизнесе является понимание потребностей клиентов и их сегментации на основе различных характеристик. Для этого можно использовать метод k – средних для выделения групп покупателей с похожими потребительскими признаками, такими, как:

- уровень дохода,
- частота покупок,
- предпочтения по лекарствам.

Рассмотрим набор данных, где каждый клиент характеризуется вектором признаков $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})$, где x_{i1} – доход, x_{i2} – частота покупок, и так далее. Метод k – средних позволяет разделить клиентов на k сегментов, минимизируя внутригрупповые различия и группируя клиентов с одинаковыми характеристиками. Это подход также подтверждается работами, представленными в литературе [1].

2. Прогнозирование спроса с учётом сезонности

Для прогнозирования спроса на определённые препараты в разные периоды времени можно использовать метод k – средних для группировки временных интервалов с похожими паттернами спроса. Пусть $X_t = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ – это временной ряд, где x_i – это количество проданных единиц товара в момент времени t_i . Кластеризация позволяет выделить временные интервалы с похожими характеристиками, например, высокий спрос на определённые препараты в зимний период или во время эпидемий [2].

Пусть t_1, t_2, \dots, t_n – это различные временные интервалы, тогда задача, заключается в минимизации дисперсии спроса внутри каждого кластера C_j и максимизации различий между кластерами [5, 4]:

$$\min_{C_1, C_2, \dots, C_k} \sum_{j=1}^k \sum_{x_i \in C_j} \|x_i - \mu_j\|^2, \quad (4)$$

где μ_j – это средний спрос для кластера C_j , а $\|x_i - \mu_j\|^2$ – это квадрат евклидова расстояния между объектом и центроидом кластера.

Научная новизна применения метода k-средних

Применение метода k-средних в контексте аптечного бизнеса представляет собой новый подход в анализе данных, так как позволяет учитывать динамичные изменения в покупательском поведении и сезонных колебаниях спроса. В отличие от традиционных методов, таких как линейная регрессия или временные ряды, метод кластеризации позволяет не только выявить скрытые закономерности, но и адаптироваться к изменениям на основе исторических данных.

Одним из новых направлений является использование метода k-средних для анализа потребительской способности в разных сегментах рынка [6]. Это может включать в себя анализ сезонных колебаний спроса на основе данных о доходах населения, а также учёт эпидемиологических факторов, таких как вспышки заболеваний [3]. Кроме того, кластеризация позволяет выявить латентные группы потребителей с похожими предпочтениями и скоростью реакции на экономические изменения [7].

Метод k-средних также может быть адаптирован для анализа мультифакторных ситуаций, где потребительские предпочтения зависят от нескольких переменных, таких как возраст, пол и уровень образования клиентов. Это предоставляет уникальную возможность для фармацевтических компаний разработать индивидуализированные маркетинговые стратегии, направленные на конкретные сегменты, что, в свою очередь, может повысить эффективность рекламных кампаний и увеличить продажи.

Кроме того, использование метода k-средних в реальном времени позволяет предприятиям быстро реагировать на изменения во рынке и потребительских запросах. Например, во время пандемии COVID-19 аптеки могли использовать кластеризацию для выявления изменений в спросе на лекарства и средства профилактики, что помогло бы оптимизировать запасы и улучшить управление поставками.

Таким образом, применение метода k-средних не только способствует более глубокому анализу данных, но и предлагает новые пути для принятия стратегических решений на уровне управления аптечным бизнесом. Это делает метод крайне актуальным для современных условий, где гибкость и адаптивность являются ключевыми факторами успеха.

Преимущества

1. Высокая эффективность для больших данных: алгоритм k-средних является достаточно быстрым и эффективным для работы с большими наборами данных, что особенно важно в условиях аптечного бизнеса, где объемы транзакций могут быть значительными. Он позволяет быстро обрабатывать информацию и получать результаты, что критично для оперативного принятия решений в условиях динамично меняющегося рынка.

2. Гибкость в применении: метод можно адаптировать для различных типов данных, включая числовые и категориальные признаки (например, типы лекарств или бренды). Это делает его универсальным инструментом, который можно применять в самых разных сферах, от медицины до маркетинга, обеспечивая высокую степень кастомизации в зависимости от специфики данных.

3. Простота интерпретации: результаты кластеризации легко интерпретировать, что позволяет аптекам разрабатывать целевые стратегии закупок и ценообразования для каждого сегмента. Чёткие группы покупателей, выделенные с помощью метода k-средних, упрощают принятие бизнес-решений, таких как подбор ассортимента или настройка маркетинговых кампаний на основании предпочтений различных групп клиентов.

4. Способность выявлять скрытые закономерности: метод k-средних эффективно выявляет скрытые связи и паттерны в данных, что позволяет выявлять неожиданные тренды или потребительские предпочтения. Это может помочь аптекам быстро адаптироваться к из-

менениям на рынке и предлагать наиболее актуальные товары, соответствующие запросам потребителей.

5. Улучшение прогнозирования: использование алгоритма для кластеризации данных о продажах позволит аптечным учреждениям предсказывать спрос на определённые препараты. Это может стать ключевым фактором для обеспечения наличия востребованных товаров и минимизации избыточных запасов, что в свою очередь снижает затраты.

6. Поддержка для комплексных аналитических задач: метод может комбинироваться с другими аналитическими техниками и платформами, что позволяет создавать более комплексные решения для анализа данных. Например, его можно интегрировать с системами машинного обучения для создания предсказательных моделей, что повысит качество принятия решений и улучшит стратегическое планирование.

7. Низкие затраты на реализацию: алгоритм может быть легко реализован с использованием популярных инструментов и языков программирования, таких как Python, R и другие, что делает его доступным для широкого круга специалистов в области анализа данных и минимизирует необходимость в дорогостоящих программных решениях.

Эти преимущества делают метод k -средних мощным инструментом для анализа данных в аптечном бизнесе и других сферах, где своевременное принятие решений и высокая адаптивность к изменениям являются критически важными.

Вызовы

1. Выбор числа кластеров: одним из основных вызовов является правильный выбор числа кластеров k , что может существенно повлиять на результаты кластеризации. Неправильно выбранное число кластеров может привести к созданию неинформативных групп или, наоборот, к чрезмерной детализированной классификации, которая не отражает реальную структуру данных. Для этого часто используется метод локтя, который позволяет найти оптимальное количество кластеров путем анализа изменения внутриклассовой дисперсии при увеличении числа кластеров. Однако этот метод не всегда дает четкие рекомендации, и принятие решения зачастую остается субъективным.

2. Чувствительность к инициализации: метод k -средних чувствителен к начальной инициализации центроидов, что может привести к локальным минимумам. Разные последовательности инициализации могут приводить к различным результатам кластеризации, делая результаты менее воспроизводимыми. Однако использование усовершенствованных методов инициализации, таких как k -средние, может уменьшить этот эффект, обеспечивая более равномерное распределение начальных центроидов и, следовательно, более стабильные результаты.

3. Обработка шумов и выбросов: методы кластеризации, включая k -средние, чувствительны к шумам и выбросам. Наличие экстремальных значений в данных может значительно исказить центры кластеров и, как следствие, влиять на результат кластеризации. Важно проводить предобработку данных, включая очистку от выбросов или использование методов устойчивой к выбросам кластеризации, таких как DBSCAN или методы медианных кластеров.

4. Однородность кластеров: метод k -средних работает лучше всего, когда настоящие кластеры имеют форму, близкую к сферам и одинаковые размеры, что не всегда соответствует реальным данным. В случаях, когда кластеры имеют сложные формы или сильно вариативные размеры, возникнут трудности с четкой градацией кластеров, что может ухудшить результаты анализа.

5. Интерпретация результатов: распределение объектов по кластерам не всегда дает очевидные или интуитивно понятные результаты. Специалисты должны обладать необходимыми навыками и инструментариями для анализа и интерпретации полученных кластеризаций, чтобы использовать результаты на практике.

6. Масштабируемость: хотя метод k-средних является эффективным методом кластеризации, его сложность растет линейно с увеличением числа объектов и кластеров. При работе с очень большими наборами данных, потребуется разработка методов ускорения, таких как использование mini-batch k-means или распределенных алгоритмов кластеризации, чтобы сохранить эффективность и управляемость процесса.

Библиографический список

1. Воробжанский Н.Н. Сверточная кластеризация методом K-средних / Н.Н. Воробжанский // Международный научно-исследовательский журнал. – 2021. – № 1-1 (103). – С. 52–56.
2. Остапов Д.С. Предобработка изображений для повышения эффективности бинаризации методом K-средних // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – С. 108–112.
3. Метод кластеризации на основе последовательного запуска K-средних с усовершенствованным выбором кандидата на новую позицию вставки / А.Н. Ткаченко, О.Ф. Грийо Тукало, А.В. Дзись, С.М. Лаховец // Научные труды Винницкого национального технического университета. – 2012. – № 1. – С. 6.
4. Тремасова Л.А., Первухина А.А., Гадасин Д.В. Использование методов Косарайю и K-средних для формирования кластеров // Электросвязь. – 2024. – № 9. – С. 47–55.
5. Семенова-Тян-Шанская В.А. Использование метода k-средних для оценки экономических показателей рейса судна / В.А. Семенова-Тян-Шанская, Т.С. Ченский // Морские интеллектуальные технологии. – 2023. – С. 205–212.
6. Галимова Е.Ю. Использование метода K-средних в решении задачи о выборе способа тестирования программной системы // Перспективы науки. – 2022. – № 7 (154). – С. 8–11.
7. Жуйкова Е.Г. Сравнительный анализ адаптивного метода K-средних и пороговой кластеризации // Перспективы науки. – 2024. – № 6 (177). – С. 92–98.

УДК 681.518.3; ГРНТИ 50.45.29

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РЕАКЦИИ ИНДУКТИВНО СВЯЗАННЫХ КОНТУРОВ НА ДВА РАЗНОПОЛЯРНЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ИМПУЛЬСА РАЗЛИЧНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ

В.В. Карасев, А.А. Михеев

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

Аннотация. В данной работе рассмотрены результаты исследования реакции индуктивно связанных контуров на последовательность из двух разнополярных прямоугольных импульсов, имеющих одинаковую по модулю амплитуду, но отличающихся друг от друга также своей длительностью.

Ключевые слова: индуктивно связанные контуры, импульсный режим, вращающаяся аппаратура, воздушный зазор, воздушный трансформатор.

STUDY OF THE PECULIARITIES OF THE RESPONSE OF INDUCTIVELY COUPLED CIRCUITS TO TWO MULTIPOLAR RECTANGULAR PULSES OF DIFFERENT DURATION

V.V. Karasev, A.A. Mikheev

*Ryazan State Radio Engineering University named V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, v.v.karasev@mail.ru*

The summary. In this paper we consider the results of investigation of the response of inductively coupled circuits to a sequence of two multipolar rectangular pulses having the same modulus of amplitude, but differing from each other also by their duration.

Keywords: inductively coupled circuits, pulse mode, rotating equipment, air gap, air transformer.

Измерения на вращающихся объектах предполагают использование в составе телеметрической системы специфического устройства бесконтактной передачи данных через

воздушный зазор между её вращающейся и стационарной частями. Среди известных способов бесконтактной передачи своей простотой и надежностью выделяется способ, предполагающий использование индуктивно связанных контуров (ИСК) на основе воздушного трансформатора [1]. Устройства на базе ИСК передают разряды кода данных с помощью импульсных сигналов и не используют элементы радиоканала, что упрощает тракт передачи и исключает связанные с ними погрешности преобразования сигналов. Важнейшими характеристиками устройств бесконтактной передачи через воздушный зазор являются амплитуда реакции ИСК на выбранный возбуждающий сигнал и её длительность. Вид сигнала возбуждения существенным образом сказывается на обоих названных параметрах реакции. Следует отметить, что при выборе импульсного сигнала возбуждения приходится идти на определенный компромисс между скоростью передачи данных и их помехозащищенностью. Последняя во многом определяется амплитудой формируемой реакции, поскольку конструкция блока воздушного трансформатора, рассчитанного не только на передачу данных, но и энергии питания от стационарной части системы на вращающуюся, предполагает надежное экранирование обмоток воздушного трансформатора [1]. На рисунке 1 приведена эквивалентная схема одинаковых параллельных индуктивно связанных контуров, возбуждаемых входным импульсным током I_1 .

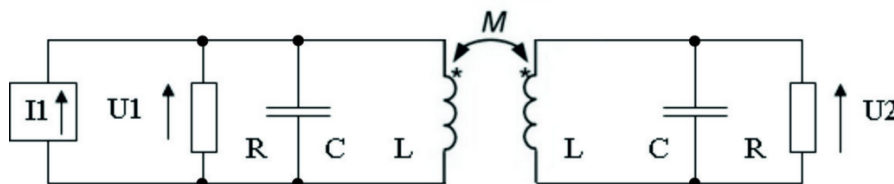


Рис. 1. Эквивалентная схема ИСК для исследования

Если на вход ИСК подать скачок тока, то реакция на него контуров, работающих в граничном режиме, будет носить аperiодический характер и опишется выражением (1):

$$U_2(k, t) = 0.5 I_0 \rho \left[\omega t - \frac{1}{\gamma} \sin(\gamma \omega t) \right] \exp\left(\frac{-2\omega t}{\sqrt{1+k}}\right), \quad (1)$$

где $\rho = \sqrt{L/C}$, $d = \rho/R$, $k = M/L$, $\omega = 1/\sqrt{LC}$, $\gamma = \sqrt{2k/(1-k^2)}$.

Известно [2], что одну из самых коротких реакций позволяет получить возбуждение ИСК импульсом экспоненциальной формы. Безусловно, для одноимпульсного возбуждения оно дает своеобразный предел длительности реакции. Однако, длительность реакции можно сократить, если на вход ИСК подавать комбинацию из трех прямоугольных импульсов, первый и третий из которых имеют отрицательную полярность и одинаковую длительность, а второй импульс положительной полярности в три раза длиннее импульсов отрицательной полярности [3]. Перед исследователями стояла задача нахождения возможного варианта сочетания прямоугольных импульсов разной полярности, который обеспечил бы сокращение времени реакции ИСК на возбуждающий сигнал.

В поисках способа возбуждения, дающего дальнейшее сокращение времени переходного процесса, была исследована реакция индуктивно связанных контуров на последовательность из двух прямоугольных импульсов одинаковой амплитуды, но разной полярности и длительности. На рисунке 2, слева показан внешний вид комбинированного из трех прямоугольных импульсов известного сигнала $ks(0.5, t)$ и исследуемого сигнала $sv(0.7, t)$ возбуждения. Первый параметр этих сигналов определяет их суммарную нормированную длительность τ , равную 0,5 для сигнала ks и 0,7 для сигнала sv . В сигнале sv положительный импульс имеет длительность $0,5\tau$, а отрицательный – оставшуюся часть времени до $0,7\tau$. На рисунке 2, справа представлены реакции связанных контуров на эти возбуждающие сигналы – соответственно $rk(0.5, 0.5, t)$ и $r(0.5, 0.7, t)$. Первый параметр реакций представляет собой коэф-

коэффициент k связи между контурами, равный 0,5. Таким образом, эпюры реакций соответствуют одинаковой суммарной нормированной длительности входных импульсных сигналов, равной 0,5.

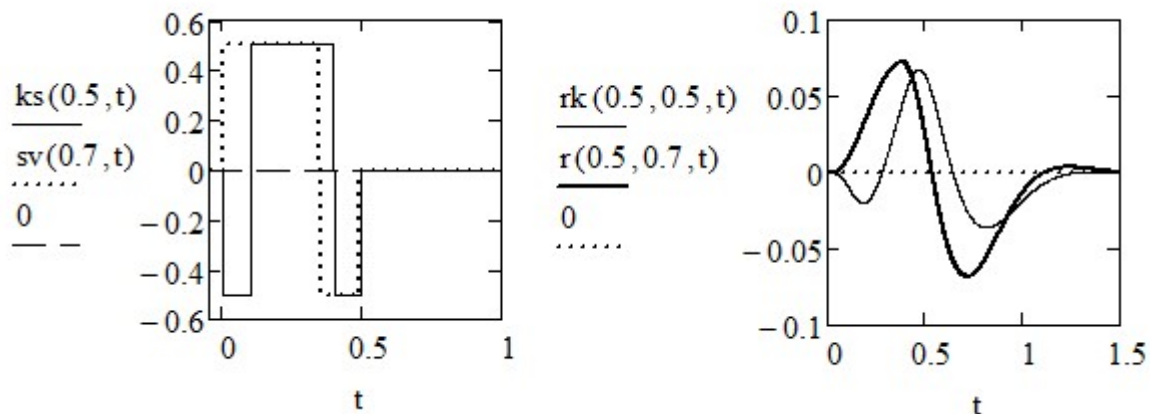


Рис. 2. Виды входных воздействий (слева) и реакции на них

Из рисунка нельзя не заметить преимущество по длительности реакции исследуемого способа возбуждения. Убедимся в этом, получив необходимые характеристики реакции r . С этой целью применим принцип суперпозиции к исследуемой линейной схеме, то есть опишем реакцию ИСК с использованием выражения (1) как алгебраическую сумму реакций на отдельные скачки тока. В результате реакция контуров на исследуемый сигнал опишется выражением (2).

$$r(k, \tau, t) = \begin{cases} 0.5U_2(k, \tau, t), 0 \leq t < \tau/2 \\ 0.5U_2(k, \tau, t) - U_2(k, \tau, t - \tau/2), \tau/2 \leq t < 0.7\tau \\ 0.5U_2(k, \tau, t) - U_2(k, \tau, t - \tau/2) + 0.5U_2(k, \tau, t - 0.7\tau), t \geq 0.7\tau \end{cases} \quad (2)$$

Сначала определим амплитуду m_1 первой полуволны реакции $r(k, \tau, t)$ в зависимости от коэффициента k связи между контурами и от нормированной длительности τ входного сигнала возбуждения. Соответствующие зависимости, полученные в результате вычислений по формулам (1) и (2) в пакете MathCAD, приведены на рисунке 3.

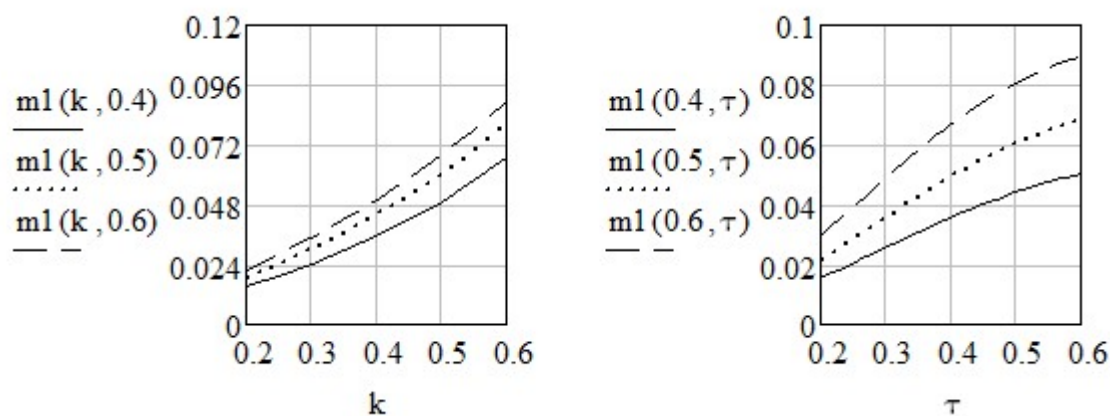


Рис. 3. Амплитуда m_1 первой полуволны реакции r на сигнал sv в зависимости от k и τ

Для полноты картины исследований на рисунке 4 показаны аналогичные рассмотренным выше зависимости амплитуды m_2 второй полуволны реакции r от параметров k и τ . То

обстоятельство, что вторая полуволна реакции получается сопоставимой по амплитуде и длительности с первой полуволной, может служить основанием для применения оригинальных способов обработки реакции, формируемой на неподвижном контуре ИСК. Приведенные на графиках значения $m1$ и $m2$ являются нормированными по отношению к величине произведения скачка входного тока I_0 на величину волнового сопротивления ρ контуров, равному одному Вольту, то есть $I_0\rho = 1$ В. Таким образом, реальная амплитуда реакции ИСК будет в $I_0\rho$ раз больше нормированной.

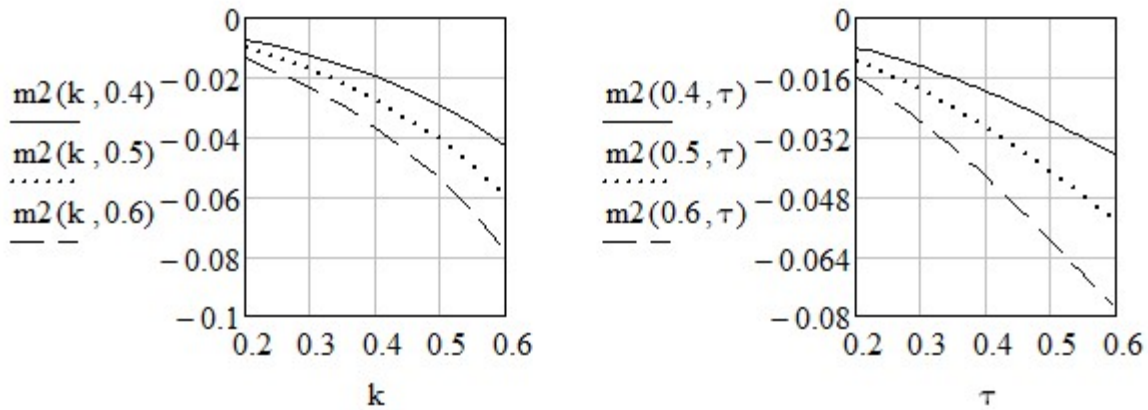


Рис. 4. Амплитуда $m2$ второй полуволны реакции r на сигнал sv в зависимости от k и τ

Зная амплитуду $m1$, можно найти длительность dr реакции ИСК на сигнал sv входного тока. Будем принимать решение о том, что сигнал закончился, на уровне $0.05 \cdot m1$. Поскольку режим работы связанных контуров граничный между апериодическими режимами и колебательными режимами, заметных осцилляций в составе реакции не наблюдается. При $k > 0,5$, что реализовать на практике далеко не всегда удастся, переходный процесс может содержать третью и даже четвертую полуволну, амплитуда которых не превышает названного уровня оценки длительности сигнала. На рисунке 5 представлены полученные зависимости длительности dr от параметров k и τ . Значения dr тоже нормированы. Реальное значение длительности реакции получают, умножая её нормированную величину на коэффициент $2\pi\sqrt{LC}$, определяемый частотными свойствами индуктивно связанных контуров, то есть их параметрами L и C .

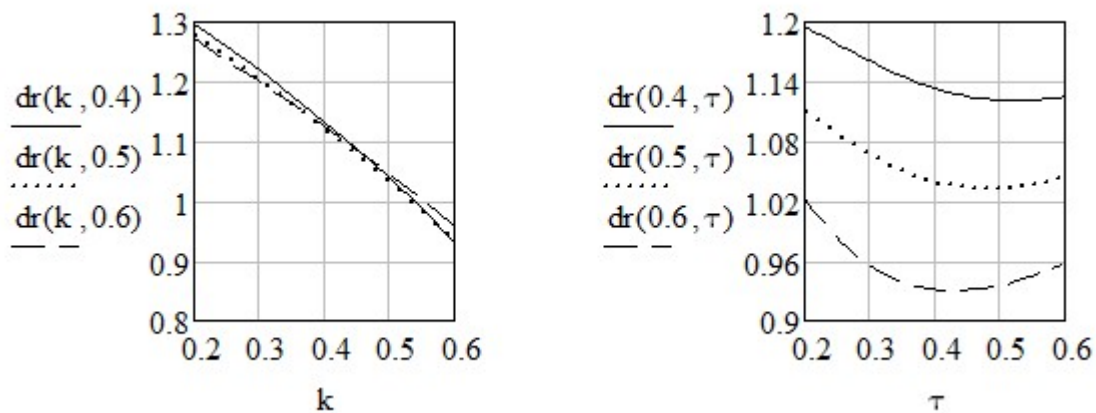


Рис. 5. Длительность реакции r на сигнал sv в зависимости от k и τ

Проведенные исследования свидетельствуют о том, что реакция ИСК на последовательность из двух разнополярных прямоугольных импульсов разной длительности по своей

амплитуде заметно уступает известным способам возбуждения, например прямоугольным и синусоидальным импульсами [2]. Проведем сравнение длительности dr реакции ИСК на возбуждающий сигнал sv с длительностью dk сигнала на выходе вторичного контура при возбуждении ИСК сигналом ks , представляющего собой комбинацию из трех разнополярных прямоугольных импульсов. Результаты сравнения оформлены в виде графиков, приведенных на рисунке 6.

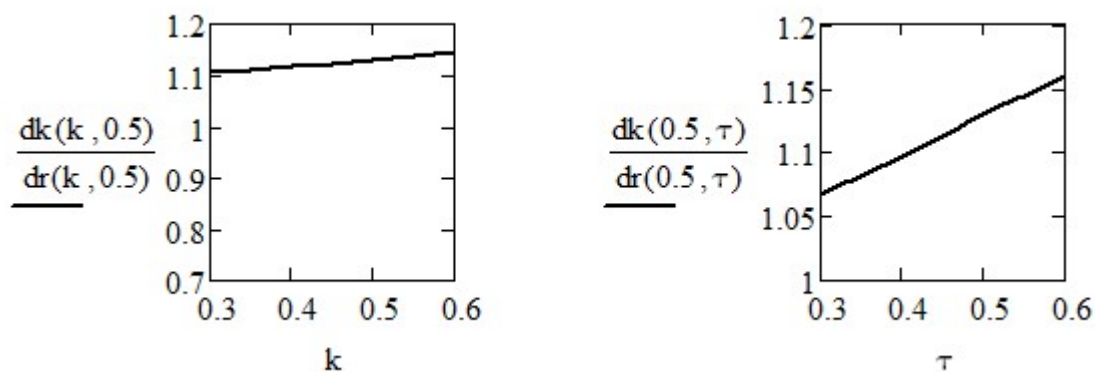


Рис. 6. Сравнение длительностей реакций на сигналы возбуждения sv и ks

Эпюры рисунка 6 убеждают в том, что длительность dr реакции на сигнал sv короче длительности dk реакции на комбинированный сигнал ks . В числовом выражении выигрыш в быстродействии рассмотренного способа возбуждения составляет 12,9 % для ИСК с k , равным 0.5, и нормированной длительности входного сигнала τ , равной 0.5.

Таким образом, подводя итоги исследований, можно говорить о том, что предложенный вид сигнала возбуждения индуктивно связанных контуров позволяет формировать на их выходе реакцию с амплитудой, не уступающей этому параметру для известного сигнала возбуждения, и имеющую длительность, которая на 6 – 17 % (в зависимости от выбранных значений k и τ) меньше его длительности. Названные обстоятельства позволяют говорить о целесообразности использования результатов исследований при построении современных устройств бесконтактной передачи данных через воздушный зазор, использующих в качестве каналобразующего компонента индуктивно связанные контуры на основе воздушного трансформатора.

Библиографический список

1. 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.
2. Зилотова М.А., Карасев В.В. Анализ эффективности некоторых способов возбуждения индуктивно связанных контуров // Современные инновации в науке и технике: Сб. научн. тр. 4-ой Межд. научно-прак. конф. (17 апреля 2014 года) / редкол.: Горохов А.А. (отв. ред.); В 4-х томах, Том 2. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2014. – С. 131-134.
3. Карасев В.В., Сеничкин В.С. Выбор комбинации прямоугольных импульсов для возбуждения индуктивно связанных контуров при передаче данных через воздушный зазор // Качество в производственных и социально-экономических системах: сб. научных статей 10-й Межд. научно-техн. конф. (15 апреля 2022 года) / редкол.: Павлов Е.В. (отв. ред.). – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2022. – С. 168-171.

УДК 621.396; ГРНТИ 50.43

СТРУКТУРА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА АНАЛИЗА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РИСКОВ ОТКАЗОВ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ

Г.А. Нетесов, В.Л. Бурковский

*Воронежский государственный технический университет,
Российская Федерация, Воронеж, grisha.netyosov@yandex.ru*

Аннотация. В статье рассматривается структура программного комплекса, предназначенного для анализа и прогнозирования рисков отказов объектов в распределенных системах управления. Актуальность исследования обусловлена ростом сложности таких систем и необходимостью минимизации простоев, вызванных отказами оборудования. Предложенная архитектура включает модули сбора данных, их предобработки, анализа в реальном времени, прогнозирования на основе методов машинного обучения и визуализации результатов. Особое внимание уделяется интеграции компонентов в единую систему, способную адаптироваться к изменениям в распределенной инфраструктуре. Статья будет полезна разработчикам систем мониторинга и специалистам в области промышленной автоматизации.

Ключевые слова: высоконадежные автономные объекты, распределенные системы управления, анализ и прогнозирование рисков, адаптивность к изменениям.

STRUCTURE OF A SOFTWARE COMPLEX FOR ANALYZING AND PREDICTING RISK OF FAILURES IN DISTRIBUTED CONTROL SYSTEMS

G.A. Netesov, V.L. Burkovsky

*Voronezh State Technical University, Voronezh,
Russian Federation, grisha.netyosov@yandex.ru*

The summary. The article examines the structure of a software complex designed for analyzing and predicting the risk of failures in distributed control systems. The relevance of the study is driven by the growing complexity of such systems and the need to minimize downtime caused by equipment failures. The proposed architecture includes modules for data collection, preprocessing, real-time analysis, machine learning-based prediction, and visualization of results. Special attention is paid to the integration of components into a unified system capable of adapting to changes in distributed infrastructure. The article will be useful to developers of monitoring systems and specialists in industrial automation.

Keywords: high-reliability autonomous objects, distributed control systems, risk analysis and prediction, adaptability to changes.

Распределенные системы управления (PCY) лежат в основе современных промышленных, энергетических и транспортных инфраструктур. Их надежность напрямую влияет на безопасность и экономическую эффективность предприятий. Однако рост масштаба и сложности таких систем увеличивает риски каскадных сбоев. Для решения этой проблемы разрабатываются программные комплексы, объединяющие методы аналитики и машинного обучения. В статье представлена модульная архитектура подобного решения, интегрирующая международные и российские подходы к прогнозной аналитике.

Архитектура программного комплекса

Программный комплекс, разработанный для анализа и прогнозирования рисков отказов в распределенных системах управления, представляет собой многоуровневую структуру, объединяющую модули, отвечающие за различные этапы обработки данных. На начальном этапе система интегрируется с источниками данных, включая датчики, SCADA-системы и внешние API, что позволяет собирать информацию о состоянии объектов в режиме реального времени. Собранные данные проходят этап предобработки, где устраняются шумы, нормализуются значения и преобразуются в формат, пригодный для дальнейшего анализа. Это критически важно для обеспечения качества входных данных, особенно в условиях работы с разнородными сигналами от промышленного оборудования.

Следующий этап – анализ данных в реальном времени – реализуется с использованием алгоритмов кластеризации, таких как DBSCAN, и статистических методов, которые позволяют оперативно выявлять аномалии. Например, внезапное увеличение вибрации станка или температуры трансформатора может сигнализировать о потенциальном отказе. Для прогнозирования долгосрочных рисков применяются методы машинного обучения, включая ансамблевые модели (Gradient Boosting) и LSTM-сети. Эти алгоритмы обучаются на основе предыдущих опытных данных, учитывая, как технические параметры оборудования, так и внешние факторы, такие как нагрузка сети или условия эксплуатации. Результаты анализа и прогнозов визуализируются через интерактивные панели управления, предоставляя операторам графики, тепловые карты и оповещения, что упрощает принятие решений. Завершающим элементом архитектуры является интеграционный слой на основе RESTful API, обеспечивающий взаимодействие с корпоративными системами (ERP, MES) для автоматизации процессов планирования ремонтов.

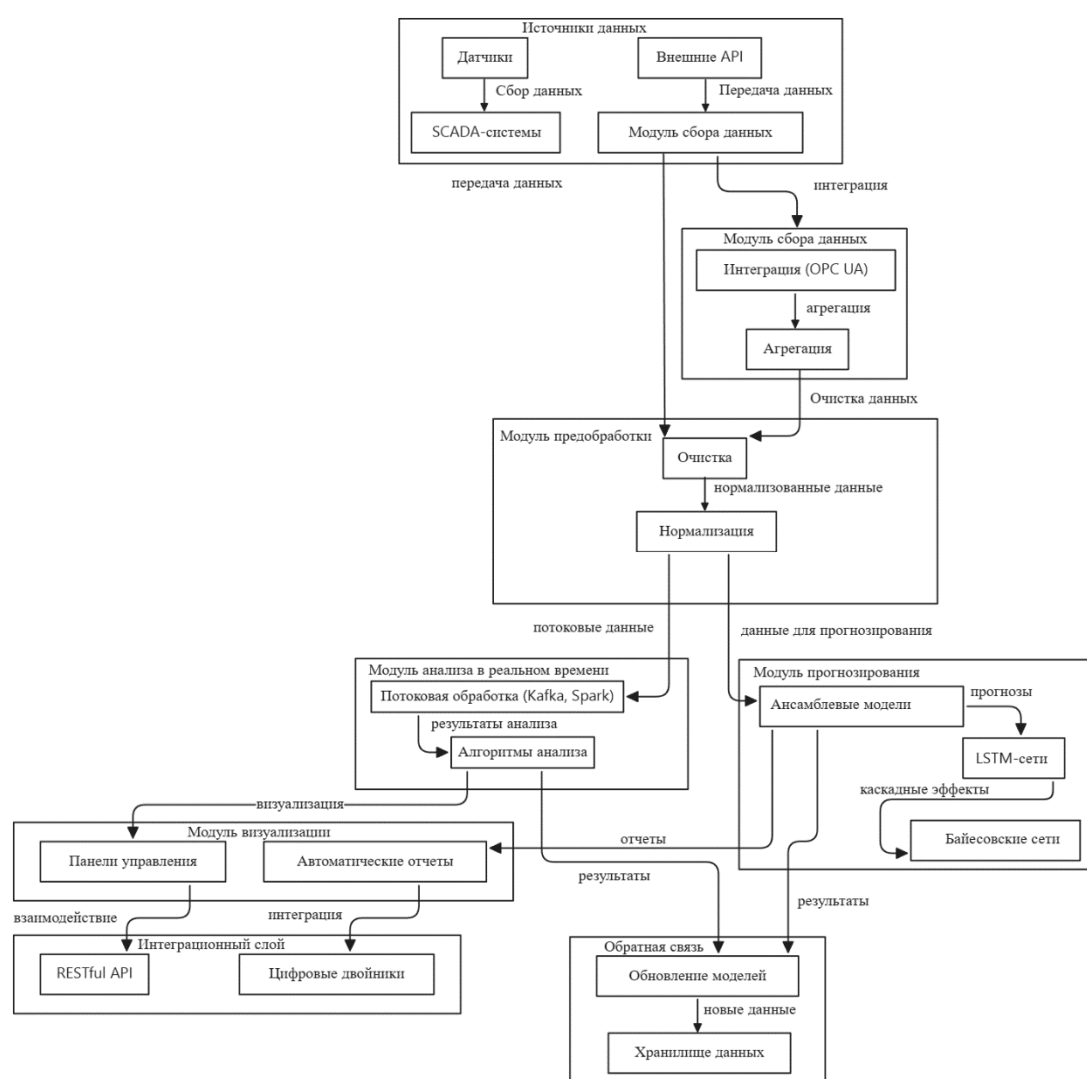


Рис. 1. Структурная схема программного комплекса анализа и прогнозирования рисков отказов в распределенных системах управления

Согласно архитектуре программного комплекса, представленного на рисунке 1, в первом блоке находятся источники данных, обеспечивающие систему исходными данными о состоянии оборудования и внешних условиях. Датчики непрерывно собирают параметры

оборудования, внешние API загружают контекстную информацию такую как: погодные условия, графики нагрузки, данные из ERP систем. Второй блок представляет собой модуль сбора данных объединяющий данные из разнородных источников в единый поток. Система подключается к SCADA через протокол OPC UA, обеспечивающий безопасную передачу данных, для Iot-устройств используются легковесные протоколы. Данные от датчиков и API объединяются в общий поток с помощью Apache Kafka, который действует как система передачи данных для информации. Третьим блоком является модуль предобработки, его функция подготовка данных к анализу. Очистка выполняется методами скользящего среднего или фильтра Калмана для удаления шумов. Нормализация приводит данные к единой шкале, а обогащение добавляет времени или категориальные признаки. Четвертый модуль, модуль анализа в реальном времени, выполняющий функцию выявления аномалий. Данные из Kafka обрабатываются с помощью Spark Streaming, алгоритмы включают DBSCAN для кластеризации аномалий и статистические методы для определения отклонений от нормы. Модуль прогнозирования выполняет оценку долгосрочных рисков отказов. Ансамблевые модели анализируют табличные данные отказов, LSTM сети обрабатывают временные ряды, а байесовские сети моделируют каскадные сценарии. За предоставление информации в удобном для оператора формате отвечает модуль визуализации, который на панелях управления отображает графики метрик, тепловые карты с «горячими точками» и оповещения с приоритетами. Отчеты формируются автоматически для планирования ремонтов. Интеграционный слой поддерживает связь с внешними системами: RESTful API передает прогнозы в ERP/MES для автоматизации заявок на ремонт, цифровые двойники получают данные для симуляции сценариев. Для обучения и улучшения моделей предусмотрена обратная связь, где архивные данные накапливаются в хранилищах, в свою очередь новые данные периодически добавляются в тренировочные наборы, повышая точность прогнозов.

Принцип работы системы

Программный комплекс интегрирует данные от датчиков, SCADA и внешних API через протоколы (OPC UA, MQTT) в единый поток (Apache Kafka). Модуль предобработки очищает, нормализует и обогащает данные. Обработанная информация анализируется в двух контурах: в режиме реального времени, при котором мгновенно выявляет аномалии, и прогнозный — оценивает риски отказов и моделирует сценарии.

Результаты визуализируются, а RESTful API автоматизирует реакции (ремонты, интеграция с ERP/MES). Система самообучается, переобучая модели на исторических данных (Hadoop). Архитектура обеспечивает модульность, масштабируемость (Kubernetes, Kafka) и совместимость с legacy-системами.

Методы анализа и прогнозирования

В основе прогнозирования рисков лежит комбинация методов машинного обучения и потоковой аналитики. Ансамблевые модели, такие как Random Forest и Gradient Boosting, демонстрируют высокую точность в оценке вероятности отказов, особенно при работе с табличными данными, где важны взаимодействия между множеством параметров. Для анализа временных зависимостей, например, постепенной деградации компонентов, применяются LSTM-сети, способные учитывать долгосрочные паттерны в исторических данных. Дополнительно используются байесовские сети для моделирования каскадных эффектов в распределенных системах, что особенно актуально в энергетике и транспорте, где локальный сбой может спровоцировать масштабные нарушения.

Обработка данных в реальном времени обеспечивается технологиями потоковой аналитики, такими как Apache Kafka и Spark Streaming, которые позволяют системе мгновенно реагировать на аномалии. Например, в энергосетях это позволяет предотвратить перегрузки,

автоматически перераспределяя нагрузку между узлами. Для работы с гетерогенными данными, поступающими от legacy-систем и современных IoT-устройств, используются стандартизированные протоколы, такие как OPC UA, обеспечивающие совместимость и безопасность передачи информации.

Применение в различных отраслях

Гибкость архитектуры комплекса позволяет адаптировать его под специфику различных отраслей. В промышленности система фокусируется на мониторинге параметров станков (вибрация, температура, нагрузка), прогнозируя износ деталей и оптимизируя графики техобслуживания. В энергетике ключевой задачей становится предотвращение перегрузок в распределительных сетях: алгоритмы анализируют данные с трансформаторов и линий электропередач, прогнозируя точки потенциальных аварий. В транспортной отрасли комплекс используется для мониторинга нагрузки на инфраструктурные узлы (например, мосты или железнодорожные пути), что помогает избежать внезапных сбоев в логистических цепочках. Модульный подход позволяет выбирать подходящие алгоритмы для каждого сценария: LSTM-сети — для долгосрочного прогнозирования в энергетике, а Random Forest — для классификации аномалий в промышленности.

Преимущества и вызовы внедрения

Внедрение подобного комплекса обеспечивает значительное сокращение эксплуатационных рисков за счет раннего обнаружения аномалий и прогнозирования отказов. Оптимизация сроков ремонтов за счет точных прогнозов позволяет сократить затраты на обслуживание, избегая как преждевременной замены компонентов, так и дорогостоящих простоев.

Однако разработка и внедрение системы сталкиваются с рядом сложностей. Гетерогенность данных, поступающих от разнородных источников (датчики, устаревшие SCADA-системы, IoT-устройства), требует использования универсальных протоколов, таких как OPC UA, и адаптивных алгоритмов предобработки. Обеспечение масштабируемости становится критическим при работе с распределенными системами, включающими тысячи узлов: здесь помогают технологии контейнеризации (Docker, Kubernetes) и распределенные вычисления. Еще одним вызовом является необходимость постоянной донастройки моделей машинного обучения под изменяющиеся условия эксплуатации, что требует интеграции с платформами непрерывного обучения и цифровыми двойниками.

Таким образом, предложенная архитектура программного комплекса не только решает актуальные задачи анализа и прогнозирования рисков, но и задает вектор для дальнейшего развития интеллектуальных систем управления, сочетая международные подходы с учетом специфики российских промышленных и энергетических инфраструктур.

Выводы: Предложенная структура программного комплекса демонстрирует потенциал в управлении рисками распределенных систем. Архитектура, основанная на модульном подходе, позволяет гибко адаптировать методы машинного обучения и потоковой аналитики под требования различных отраслей — от промышленности до энергетики. Ключевые вызовы, такие как гетерогенность данных и масштабируемость, решаются за счет стандартизации протоколов и современных технологий контейнеризации. Дальнейшие исследования могут быть направлены на интеграцию с цифровыми двойниками и развитие методов федеративного обучения, что соответствует как международным, так и российским трендам в области промышленной аналитики.

Библиографический список

1. Bishop C. M. Pattern Recognition and Machine Learning. – Springer, 2006. – 738 p.
2. Provost F., Fawcett T. Data Science for Business. – O'Reilly Media, 2013. – 414 p.
3. Varga P., et al. Edge Computing and AI for Real-Time Anomaly Detection in Cyber-Physical Systems // Future Internet. – 2021. – Vol. 13(8). – P. 187.
4. Richardson L., Ruby S. RESTful Web Services. – O'Reilly Media, 2008. – 448 p.
5. Иванов А.В., Петров С.К. Машинное обучение в промышленной аналитике: методы и практика. – М.: Наука, 2020. – 320 с.
6. Кузнецова Е.А., Григорьев В.М. Прогнозная аналитика в энергетике: методы и кейсы. – СПб.: Питер, 2021. – 288 с.
7. Белов А.А., Шестаков Д.В. Анализ временных рядов в технических системах. – М.: Техносфера, 2022. – 352 с.
8. Горбунов М.И. Стандарты OPC UA в промышленной автоматизации. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет, 2020. – 280 с.

УДК 004.42; ГРНТИ 14.01.85

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ГЕНЕРАЦИИ ТЕСТОВЫХ ЗАДАНИЙ НА ОСНОВЕ УЧЕБНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СФЕРЕ

Ю.А. Руднев, К.В. Шорина, Т.А. Эйнуллаев

Воронежский государственный университет инженерных технологий,
Российская Федерация, Воронеж, rudnev2020@gmail.com

Аннотация. В данной работе представлена разработка "Система автоматизированной генерации тестовых заданий на основе учебных материалов с применением технологий искусственного интеллекта в образовательной сфере". Предложенное решение ориентировано на упрощение создания уникальных тестовых заданий для повышения эффективности образовательного процесса. Представлена архитектура системы, использующая клиент-серверную модель.

Ключевые слова: автоматизация, образовательный процесс, тестовые задания, искусственный интеллект.

DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR AUTOMATED TEST TASKS GENERATION BASED ON EDUCATIONAL MATERIALS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES IN THE EDUCATIONAL SPHERE

Yu. A. Rudnev, K. V. Shorina, T. A. Eynullaev

Voronezh State University of Engineering Technologies,
Russian Federation, Voronezh, rudnev2020@gmail.com

The summary. This paper presents the development of "A system for automated test task generation based on educational materials using artificial intelligence technologies in the educational sphere". The proposed solution is aimed at simplifying the creation of unique test tasks to improve the efficiency of the educational process. The system architecture using a client-server model is presented.

Keywords: automation, educational process, test tasks, artificial intelligence.

Введение

Современные образовательные методики активно используют тестирование для оценки знаний учащихся. Оно позволяет быстро и эффективно определить уровень освоения материала, выявить пробелы в знаниях и скорректировать образовательный процесс. Однако, в связи с развитием интернет-технологий, на большинство тестовых заданий легко найти гото-

вые ответы в интернете. Также, многие тесты не учитывают специфику учебного материала и цели конкретного курса.

В связи с этим преподаватель должен самостоятельно разрабатывать тестовые материалы. Но составление качественных тестовых заданий – это сложный и времязатратный процесс. Учитывая высокую загруженность педагогов, особенно в условиях массового обучения, возникает необходимость в автоматизации этого процесса.

Применение искусственного интеллекта открывает новые перспективы в генерации тестовых заданий. Подобные системы способны анализировать текст учебных материалов, выделять ключевые понятия, формулировать вопросы и подбирать варианты ответов.

Целевой аудиторией разрабатываемой системы являются преподаватели средних и высших учебных заведений. К ним относятся: учителя школ, преподаватели колледжей и вузов, которые сталкиваются с необходимостью регулярно создавать контрольные работы, проверочные и экзаменационные материалы.

Исходя из всего вышесказанного, разработка системы автоматизированной генерации тестовых заданий на основе учебных материалов с применением технологий искусственного интеллекта в образовательной сфере представляет собой актуальную задачу, которая способна существенно повысить эффективность образовательного процесса.

Данная научная работа ставит перед собой цель разработку системы автоматизированной генерации тестовых заданий на основе учебных материалов с применением технологий искусственного интеллекта в образовательной сфере.

В рамках этой цели были поставлены следующие задачи:

1. Выбрать тип системы.
2. Спроектировать архитектуру системы.
3. Разработать прототип системы.

Тип системы

Было решено разработать систему автоматизированной генерации тестовых заданий на основе учебных материалов с применением технологий искусственного интеллекта в образовательной сфере в рамках веб-приложения.

Данный тип позволит пользователям использовать систему с любого устройства, имеющего доступ к сети интернет. Это позволит преподавателям и учащимся пользоваться системой удаленно, не загружая различные пакеты программ. Пользователям не нужно будет беспокоиться об обновлениях системы, так как сервис будет загружаться через интернет-браузер.

Такой подход позволяет реализовать кроссплатформенность, чтобы каждый пользователь имел возможность воспользоваться системой со стационарного компьютера, ноутбука, планшета или телефона.

Проектирование архитектуры системы

Структура системы автоматизированной генерации тестовых заданий на основе учебных материалов с применением технологий искусственного интеллекта в образовательной сфере представляет собой клиент-серверную архитектуру [1]. Ее принцип заключается в разделении функций между двумя основными компонентами: клиентской частью и серверной.

Клиентская часть отвечает за взаимодействие с пользователем и выполняет запросы к серверу. Серверная часть осуществляет обработку этих запросов и предоставляет клиенту необходимые данные, а также отвечает за бизнес-логику приложения.

На рисунке 1 изображена архитектура разрабатываемой системы.

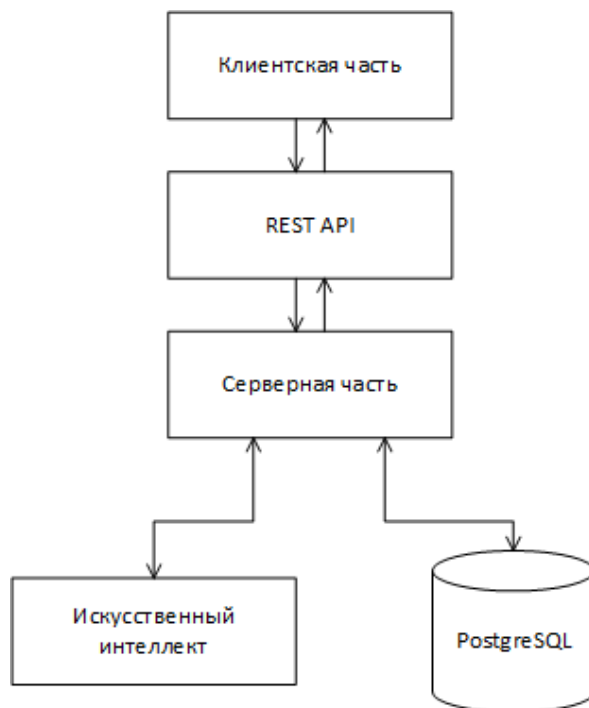


Рис. 1. Архитектура системы

Серверная часть разработана языке программирования Java с использованием фреймворка Spring Boot [2]. Java позволяет запустить серверную часть на различных операционных системах и серверах приложений без изменения кода.

Spring Boot предоставляет встроенные шаблоны и автоматическую настройку проекта, что позволяет запустить веб-приложение быстро, без необходимости конфигурировать множество параметров вручную. Фреймворк поддерживает архитектуру REST API [3], применяемую для настройки взаимодействия между серверной и клиентской частями.

Spring Boot интегрирован с такими модулями экосистемы Spring, как Spring Security, обеспечивающий безопасность веб-приложения, и Spring AI [4].

Spring AI – это библиотека, упрощающая настройку работы с различными системами искусственного интеллекта.

Spring Boot позволяет легко и удобно взаимодействовать с базами данных, в рамках этой системы, используется объектно-реляционная система управления базами данных PostgreSQL.

Клиентская часть разработана на фреймворке Vue.js [5]. Данный фреймворк позволяет создать интуитивно понятные и динамичные интерфейсы для веб-приложений. Vue.js [6] оптимизирован для работы с элементами веб-страницы, обеспечивая высокую скорость обновления пользовательских интерфейсов. Еще одно достоинство, фреймворк легко интегрируется с REST API, что упрощает взаимодействие с серверной частью.

Диаграмма последовательности

На рисунке 2 представлена диаграмма последовательности взаимодействия пользователя с сервисом генерации тестовых заданий.

Процесс взаимодействия состоит из нескольких этапов. Сначала пользователь загружает файл с учебными материалами через веб-интерфейс. После этого клиент отправляет запрос на сервер для обработки загруженного документа. Сервер принимает запрос и обрабатывает файл, извлекает данные из него и передаёт их в модуль искусственного интеллекта.

ИИ генерирует тестовые задание на основе загруженных материалов, совершая следующие действия. Сначала он предварительно обрабатывает текст: удаляет лишние символы, нормализует и разделяет тексты на слова и предложения. Затем ИИ выделяет ключевые понятия, используя специализированные алгоритмы, например, TF-IDF, чтобы определить наиболее важные термины в темах и текстах. На основе выделенных ключевых понятий искусственный интеллект формирует структуру вопросов.

После завершения процесса генерации теста ИИ возвращает результат серверу, где он конвертируется в PDF-файл. Формируется ссылка для скачивания и выводится клиентом. Пользователь загружает PDF-файл.

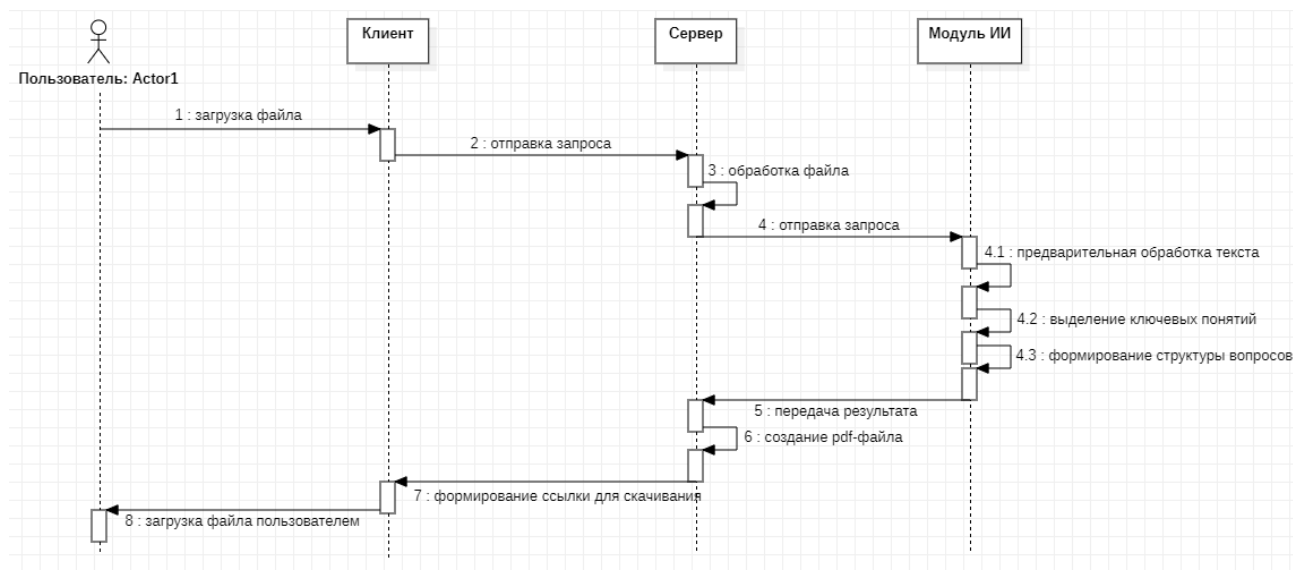


Рис. 2. Диаграмма последовательности

Разработка прототипа системы

Прототип веб-страницы системы автоматизированной генерации тестовых заданий включает в себя несколько ключевых элементов интерфейса: загрузка учебных материалов (рисунок 3) и скачивание результатов генерации (рисунок 4).

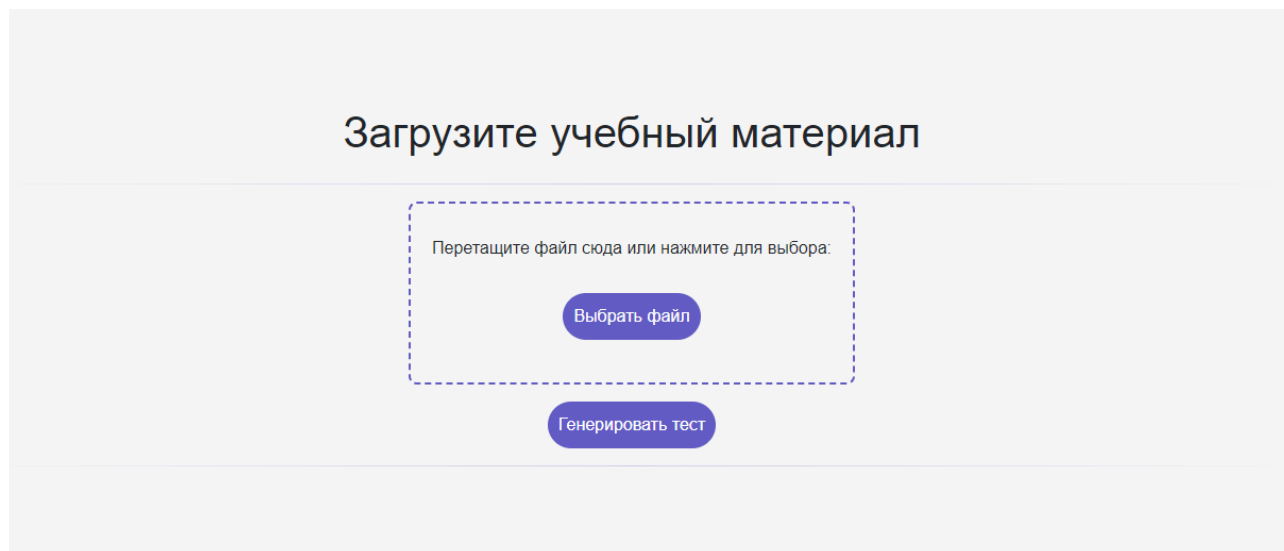


Рис. 3. Окно загрузки учебных материалов

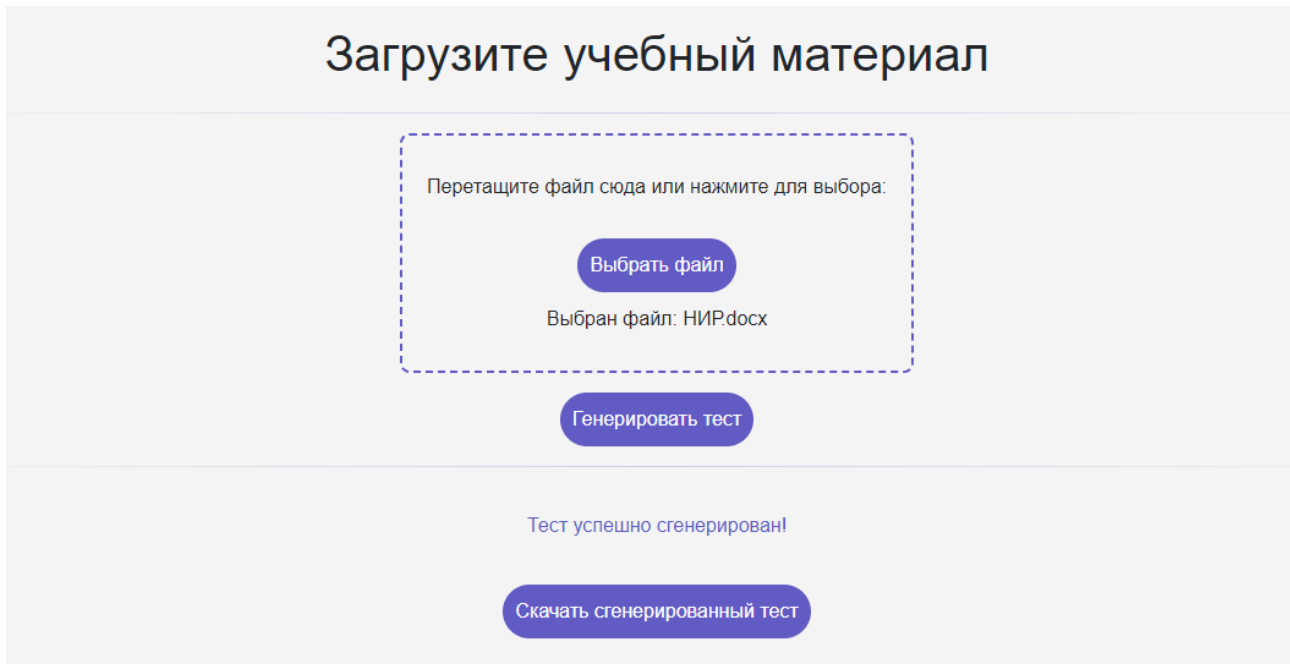


Рис. 4. Конечный результат

Заключение

Таким образом, были достигнуты задачи, поставленные в данной работе, а это:

1. Выбран тип системы.
2. Спроектирована архитектура системы.
3. Разработан прототип системы.

Следовательно, цель разработка системы автоматизированной генерации тестовых заданий на основе учебных материалов с применением технологий искусственного интеллекта в образовательной сфере достигнута.

Работа выполнена под научным руководством И.С. Толстовой.

Библиографический список

1. Основные принципы клиент-серверной архитектуры. [Электронный ресурс] – URL: <https://sky.pro/wiki/java/osnovnye-principy-klient-servernoj-arhitektury/> - Дата обращения: 13.10.2024.
2. Уоллс Крейг Spring в действии [Текст] / Уоллс Крейг — Шестое издание. — Москва: ДМК Пресс, 2022 — 544 с.
3. REST, что же ты такое? Понятное введение в технологию для ИТ-аналитиков. [Электронный ресурс] – URL: <https://habr.com/ru/articles/590679/> - Дата обращения: 14.10.2024.
4. Introduction to Spring AI. [Электронный ресурс] – URL: <https://www.baeldung.com/spring-ai> - Дата обращения: 14.10.2024.
5. Все, что нужно для начала работы с Vue.js. – [Электронный ресурс] – URL: <https://habr.com/ru/companies/ruvds/articles/458324/> - Дата посещения: 22.10.2024.
6. Эрик Хэнчетт, Бенджамин Листуон Vue.js в действии [Текст] / Эрик Хэнчетт, Бенджамин Листуон — Санкт-Петербург: Питер, 2021 — 306 с.

УДК 004.413; ГРНТИ 50.41.25

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АНАЛИЗА ПЛАТЕЖНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ АБОНЕНТОВ ПРЕДПРИЯТИЙ ЖКХ

В.И. Юркова, А.В. Маркин

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, yurkova935@yandex.ru*

Аннотация. В работе рассматривается проблема анализа платежной дисциплины абонентов предприятий жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ). Основное внимание уделяется разработке автоматизированной системы, способной анализировать и прогнозировать платежное поведение абонентов. Результаты исследования показывают, что внедрение системы анализа платежной дисциплины позволит повысить финансовую устойчивость предприятий ЖКХ и улучшить качество предоставляемых услуг.

Ключевые слова: платежная дисциплина, жилищно-коммунальное хозяйство (ЖКХ), анализ данных, автоматизация, прогнозирование, информационные системы, статистические методы, машинное обучение.

DEVELOPMENT OF A PAYMENT DISCIPLINE ANALYSIS SYSTEM SUBSCRIBERS OF HOUSING AND COMMUNAL SERVICES ENTERPRISES

V.I. Yurkova, A.V. Markin

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, yurkova935@yandex.ru*

Annotation. The paper considers the problem of analyzing the payment discipline of subscribers of housing and communal services (HCS) enterprises. The main focus is on developing an automated system capable of analyzing and predicting subscribers' payment behavior. The results of the study show that the introduction of a payment discipline analysis system will increase the financial stability of housing and communal services enterprises and improve the quality of services provided.

Keywords: payment discipline, housing and communal services, data analysis, automation, forecasting, information systems, statistical methods, machine learning.

В настоящее время жилищно-коммунальные услуги являются неотъемлемой частью быта большинства людей. Тем не менее, стоит отметить, что многие граждане несвоевременно оплачивают данные услуги, и это обусловлено не только экономическими причинами, но и недостаточной осведомленностью в данном вопросе.

Анализ ситуации показывает, что значительная часть населения демонстрирует низкий уровень финансовой грамотности в сфере ЖКХ, о чём свидетельствует большое количество случаев неуплаты, негативно влияющих как на потребителей, так и на поставщиков жилищно-коммунальных услуг [1].

В общем случае, под платежной дисциплиной понимается обязанность физического или юридического лица, имеющего кредитные обязательства, в установленные сроки осуществлять платежи.

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 [2].

Высокие расходы на коммунальные услуги зачастую являются причиной несоблюдения платежной дисциплины. Существует ряд методов, которые позволяют снизить такие расходы. Например, установка энергосберегающих приборов (светодиодных или энергоэффективных ламп, розеток и т. д.), счётчиков воды, газа и отопления может привести к сокращению расходов в долгосрочной перспективе.

Однако предприятия-поставщики услуг ЖКХ нуждаются в разработке систем стимулирующих потребителей своевременно оплачивать коммунальные услуги. Для повышения эффективности работы сервиса необходимо внедрить средство анализа, которое позволит

отслеживать платёжную дисциплину каждого из абонентов, выявлять тенденции и проблемы, а также прогнозировать возможные неплатежи.

Таким образом, разработка системы анализа платёжной дисциплины абонентов предприятий ЖКХ представляет собой актуальную задачу, которая позволит организациям ЖКХ решить ряд проблем, связанных с управлением финансами и улучшением качества предоставляемых услуг.

Статистические методы анализа данных

Существует множество методов анализа данных, каждый из которых предназначен для решения определенных задач. Математическая формализация играет ключевую роль в эффективном применении различных методов анализа данных. Она позволяет перевести изучаемые объекты и явления в математическую форму, представив их в виде формализованных моделей или структур.

Процесс математической формализации предполагает выделение ключевых характеристик изучаемого объекта и их описание с помощью математических конструкций, таких как множества, функции, матрицы и другие математические объекты. Это дает возможность применять к полученным моделям строгие логические рассуждения, количественные методы и вычислительные алгоритмы.

Для математической формализации абонента предприятия ЖКХ можно предложить следующий подход:

Пусть:

$A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ – множество всех абонентов предприятия ЖКХ, где a_i – i -ый абонент.

Каждого абонента a_i можно описать вектором характеристик:

$$a_i = (x_1, x_2, \dots, x_m), \quad (1)$$

где x_j – j -ая характеристика абонента, например:

x_1 – тип жилья (квартира, частный дом и т.д.),

x_2 – площадь жилья,

x_3 – количество проживающих,

x_4 – среднемесячное потребление ресурсов (электроэнергия, вода),

x_5 – история платежей (своевременность, задолженность),

x_6 – социальный статус (пенсионер, многодетная семья и т.д.).

Таким образом, множество всех абонентов A можно представить как:

$$A = \{(x_1^1, x_2^1, \dots, x_m^1), (x_1^2, x_2^2, \dots, x_m^2), \dots, (x_1^n, x_2^n, \dots, x_m^n)\}. \quad (2)$$

Подобное математическое описание абонентов позволяет использовать широкий спектр методов анализа данных. Каждый из этих методов имеет свои особенности, применения и математические основы. Основными методами интеллектуального анализа данных являются:

1. Классификация: Метод классификации используется для разделения объектов на заранее определенные классы или категории на основе их характеристик. Для классификации могут использоваться различные алгоритмы, такие как метод ближайших соседей, логистическая регрессия, случайный лес и т. д. [3].
2. Кластеризация: Кластерный анализ или кластеризация позволяет группировать объекты на основе их сходства без предварительно заданных категорий. Целью является

- выявление внутригрупповых сходств и межгрупповых различий. Алгоритмы кластеризации включают k-средних, иерархическую кластеризацию, DBSCAN и другие [4].
3. Регрессионный анализ: Регрессионный анализ используется для изучения отношений между зависимыми и независимыми переменными. Он помогает предсказывать значения зависимой переменной на основе независимых переменных. Примеры методов регрессии включают линейную регрессию, логистическую регрессию, полиномиальную регрессию и т. д. [5].
 4. Поиск ассоциативных правил: Этот метод используется для обнаружения взаимосвязей и зависимостей между различными элементами в наборе данных. Он позволяет выявить правила типа "если-то", которые помогают понять взаимосвязи между различными элементами [6].
 5. Обнаружение аномалий: Метод обнаружения аномалий направлен на выявление необычных или аномальных паттернов в данных, которые могут указывать на ошибки, мошенничество или другие нестандартные ситуации. Различные подходы к обнаружению аномалий включают LOF (Local Outlier Factor), Isolation Forest, One-Class SVM и другие [7].

Таблица 1 содержит названия методов интеллектуального анализа данных, которые будут использоваться для анализа платежной дисциплины абонентов, а также приведены примеры основных задач, которые будет решать разрабатываемая система.

Таблица 1. Примеры задач и методов анализа данных в сфере анализа платежной дисциплины

Метод анализа данных	Задача и пример
Классификация	Определение платежной дисциплины абонента (своевременный/несвоевременный плательщик) на основе данных об истории платежей, социально-демографических характеристик. Пример: построение модели логистической регрессии для классификации абонентов.
Кластеризация	Выявление групп абонентов с похожими профилями платежной дисциплины. Пример: применение алгоритма K-средних для кластеризации абонентов по показателям своевременности оплаты, задолженности, частоты просрочек; Группировка зданий по схожим энергетическим характеристикам для разработки индивидуальных рекомендаций по повышению энергоэффективности. Пример: использование методов кластеризации для выделения кластеров зданий с похожим потреблением энергии.
Регрессионный анализ	Прогнозирование размера задолженности абонентов. Пример: построение модели линейной регрессии для предсказания суммы задолженности на основе истории платежей, характеристик абонента и местоположения; Прогнозирование потребления ресурсов (электричества, воды, тепла) на основе исторических данных, погодных условий и социально-экономических факторов. Пример: применение моделей временных рядов (ARIMA, экспоненциальное сглаживание) для прогнозирования будущего потребления.
Поиск ассоциативных правил	Выявление связей между характеристиками абонентов и их платежной дисциплиной. Пример: применение алгоритма Apriori для поиска правил вида "Если абонент проживает в районе X и имеет задолженность более Y рублей, то вероятность просрочки платежа составляет Z%"; Обнаружение связей между параметрами работы оборудования и возникновением нестандартных ситуаций. Пример: использование алгоритма Apriori для выявления правил вида "Если давление в трубопроводе ниже X и температура выше Y, то вероятность аварии составляет Z%".
Обнаружение аномалий	Выявление абонентов с аномальным поведением в оплате счетов, которые могут указывать на мошенничество или ошибки. Пример: использование алгоритма LOF (Местные выбросы) для определения абонентов, платежные профили которых значительно отличаются от большинства; Обнаружение нестандартных ситуаций в работе оборудования. Пример: применение методов одноклассовых SVM для выявления отклонений в показаниях приборов учета, которые могут свидетельствовать о возможных авариях.

Реализация методов подготовки полученных данных осуществляется с помощью возможностей языка программирования Python.

Описание процесса анализа данных

На рисунке 1 показан сценарий события «Формирование отчета по абоненту», которое инициируется пользователем, желающим узнать информацию о платежной дисциплине выбранного абонента.

В схеме сценария событий используется следующий ряд условных обозначений:

- 1) данные, поступающие в систему или исходящие из нее, представлены в эллипсах;
- 2) управляющая информация показана стрелками в верхней части прямоугольников;
- 3) внутрисистемные данные показаны справа от прямоугольников;
- 4) исключительные ситуации показаны в нижней части прямоугольников. Там, где возможно несколько исключительных ситуаций, они заключаются в общий прямоугольник;
- 5) имя следующего события, ожидаемого после завершения сценария, приводится в затененном прямоугольнике.

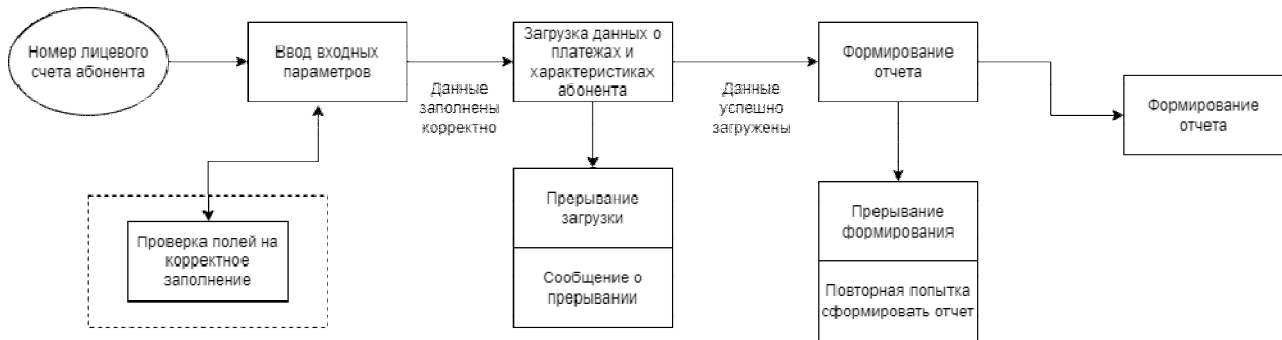


Рис. 1. Сценарий события «Формирование отчета по абоненту»

Проектирование функциональных элементов

Концептуальная модель архитектуры изображена на рисунке 2.

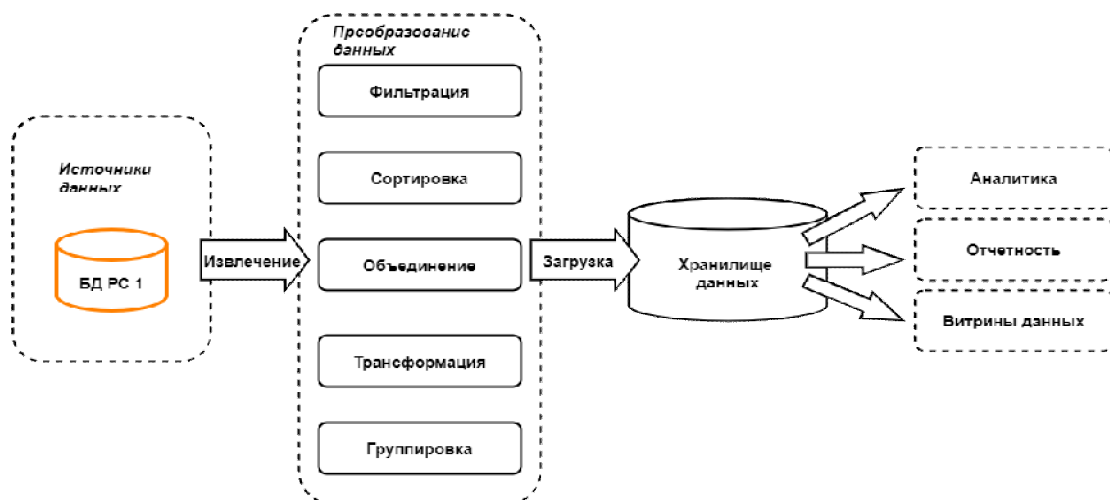


Рис. 2. Концептуальная модель архитектуры

Компонент извлечения отвечает за получение данных из баз данных расчетной и платежной систем. Компонент преобразования отвечает за обработку и трансформацию данных для их структурирования и очистки перед загрузкой. На этом этапе нужно убедиться, что

данные соответствуют формату, установить соответствия справочников, провести агрегацию, фильтрацию и денормализацию, если это необходимо. Компонент загрузки отвечает за отправку обработанных данных в целевую систему (базу данных или хранилище). На этом этапе компонент обеспечивает выполнение процесса в соответствии с запланированным графиком, обработав все контрольные мероприятия, такие как проверку на дубликаты и ошибки формата. На последнем этапе данные, находящиеся в хранилище используются инструментами динамического построения отчетов и витрин данных, составления запросов к хранилищу данных для глубокого анализа.

Исходя из имеющихся модулей и объектов концептуальной модели, разработана диаграмма компонентов (рисунок 3). Данная диаграмма отображает состав системы и демонстрирует зависимости компонентов.

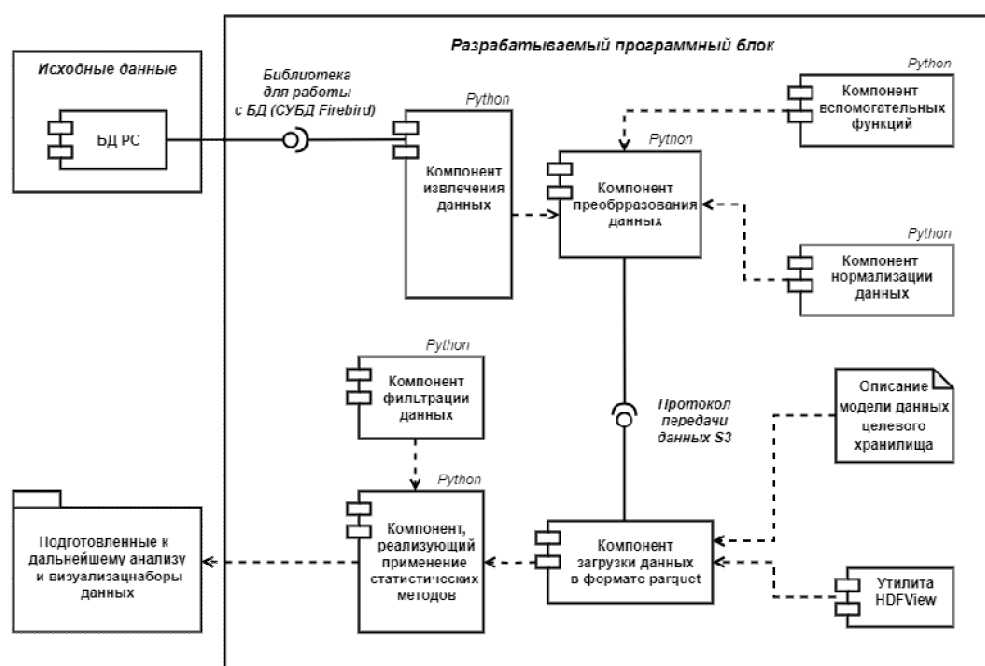


Рис. 3. Диаграмма компонентов подсистемы

Для работы с исходной базой данных используются программные библиотеки на языке Python. 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.

Компонент извлечения данных посредством обращения к исходным БД осуществляет инкрементальную выгрузку данных. Это означает, что в хранилище загружаются только те записи, которые изменились (вставки, обновления и удаления) с момента последней загрузки; а не полную загрузку всех данных (всех записей, включая те, которые не изменились с момента последней загрузки) в хранилище.

Исходные данные могут содержать ошибки или быть представлены в форматах, не применимых в дальнейшем процессе создания аналитических отчетов, поэтому их нужно корректировать. Поэтому, для корректного отображения данных в программном блоке разработан компонент преобразования.

Полученная в ходе выгрузки и преобразования информация сохраняется в формат данных parquet. Для загрузки данных в общее хранилище используется протокол S3.

Заключение

Использование современных информационных технологий в анализе платежной дисциплины абонентов предприятий жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ) открывает новые возможности для автоматизации процессов управления финансами. Применение методов машинного обучения и статистического анализа позволяет значительно ускорить обработку данных, выявление закономерностей и прогнозирование платежного поведения, что особенно актуально в условиях роста объемов информации и необходимости повышения финансовой устойчивости.

В данной работе рассмотрен подход, основанный на интеграции различных методов анализа данных в рамках единой системы, предназначенной для автоматизации анализа платежной дисциплины. Этот метод позволяет эффективно обрабатывать данные о платежах, выявлять проблемные группы абонентов и прогнозировать возможные неплатежи, что снижает временные и финансовые затраты организаций.

Применение доступных инструментов анализа данных делает данный подход приемлемым как для крупных предприятий, так и для небольших организаций ЖКХ. Прикладное значение результатов работы заключается в том, что предложенная система может быть использована для создания эффективных инструментов поддержки управления финансами. Это позволит уменьшить нагрузку на сотрудников, минимизировать риски неплатежей и повысить качество обслуживания клиентов. Внедрение подобного решения способствует более эффективному управлению финансовыми потоками и стимулирует развитие инновационных подходов в сфере ЖКХ.

Библиографический список

1. Подольский, Г. В. Гражданско-правовые основы повышения платежной дисциплины «неотключаемых» потребителей энергетических ресурсов / Г. В. Подольский // Образование и право. – 2023. – № 1. – С. 217-223. – DOI 10.24412/2076-1503-2023-1-217-223.
2. Лапшин, Н. П. Проблемы повышения платежной дисциплины населения / Н. П. Лапшин // Актуальные вопросы экономики, управления и права: сборник научных трудов (ежегодник). – 2014. – № 6. – С. 42-51.
3. Белкин, Д. А. Анализ работы энергосбытовой компании по повышению платежной дисциплины физических лиц / Д. А. Белкин // Аллея науки. – 2017. – Т. 3, № 13. – С. 943-948.
4. Медведева, Н. Г. О повышении платежной дисциплины в сфере жилищно-коммунального хозяйства / Н. Г. Медведева // Водосбережение, мелиорация и гидротехнические сооружения как основа формирования агрокультурных кластеров России в XXI веке : Сборник докладов XVIII международной научно-практической конференции: в 3-х томах, Тюмень, 18 марта 2016 года. Том 2. – Тюмень: ФГБОУ ВПО "Тюменский государственный архитектурно-строительный университет", 2016. – С. 69-76.
5. Анализ данных : учебник для вузов / В. С. Мхитарян [и др.] ; под редакцией В. С. Мхитаряна. — Москва : Издательство Юрайт, 2024. — 490 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-00616-2. — Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. — URL: <https://urait.ru/bcode/536007> (дата обращения: 21.06.2024).
6. Миркин, Б. Г. Базовые методы анализа данных : учебник и практикум для вузов / Б. Г. Миркин. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2024. — 261 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-18842-4. — Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. — URL: <https://urait.ru/bcode/551786> (дата обращения: 21.06.2024).
7. Гинько А. Ю. Анализ и визуализация данных в Yandex DataLens. Подробное руководство: от новичка до эксперта. – М.: ДМК Пресс, 2023. – 356 с.

УДК 004.9; ГРНТИ 47.47

РАЗРАБОТКА ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ СОТРУДНИКОВ ИТ-ПРЕДПРИЯТИЯ

Т.В. Гладких*, Л.А. Коробова**

Воронежский государственный университет инженерных технологий,
Российская Федерация, Воронеж, *gtv1113@rambler.ru, **lyudmila_korobova@mail.ru

Аннотация. Современные ИТ предприятия сталкиваются с рядом специфических проблем, связанных с необходимостью автоматизации рутинных операций, организации эффективного управления проектами и обеспечения высокого уровня безопасности корпоративных данных. Готовые программные решения, представленные на рынке, зачастую не учитывают особенности и потребности конкретной компании, что приводит к необходимости создания индивидуальных систем, способных адаптироваться под уникальные бизнес-процессы. В связи с этим выбор архитектурных решений, технологического стека и методов разработки приобретает первостепенное значение. В данной работе рассмотрен выбор платформы на базе Java Spring для серверной части, библиотеки React для создания современного пользовательского интерфейса, а также системы управления базами данных PostgreSQL, известной своей надежностью и производительностью. Такой набор технологий позволяет обеспечить необходимую гибкость, масштабируемость и безопасность веб-ориентированного приложения.

Ключевые слова: интеграция, кибербезопасность, микросервисный подход, рабочий процесс, платформа

DEVELOPMENT OF AN EDUCATIONAL PLATFORM FOR THE TRAINING OF IT COMPANY EMPLOYEES

T.V. Gladkikh*, L.A. Korobova**

Voronezh State University of Engineering Technologies,
Russian Federation, Voronezh, *gtv1113@rambler.ru, **lyudmila_korobova@mail.ru

Annotation. Modern IT enterprises face a number of specific problems related to the need to automate routine operations, organize effective project management and ensure a high level of corporate data security. Ready-made software solutions available on the market often do not take into account the specifics and needs of a particular company, which leads to the need to create individual systems that can adapt to unique business processes. In this regard, the choice of architectural solutions, technological stack and development methods is of paramount importance. This paper considers the choice of a Java Spring-based platform for the server side, the React library for creating a modern user interface, as well as the PostgreSQL database management system, known for its reliability and performance. This set of technologies allows for the necessary flexibility, scalability, and security of a web-based

Keywords: integration, cybersecurity, microservice approach, workflow, platform

Современная разработка программного обеспечения все больше ориентируется на интеграцию принципов DevOps, что предполагает тесное взаимодействие процессов разработки, тестирования и эксплуатации продукта. Автоматизация сборки, развертывания и мониторинга позволяет существенно сократить время выхода новых версий приложения, повысить их качество и оперативно реагировать на возможные сбои. Важную роль в данном процессе играет автоматизированное тестирование, которое охватывает как модульное, так и интеграционное тестирование, а также проведение нагрузочных испытаний. Применение современных инструментов, таких как Git для контроля версий, Jenkins или GitLab CI/CD для реализации непрерывной интеграции и Docker/Kubernetes для контейнеризации и оркестрации, позволяет создать эффективную и надежную инфраструктуру для поддержки жизненного цикла приложения [1].

Не менее важным аспектом является обеспечение кибербезопасности разрабатываемой системы. Рост числа кибератак и постоянное совершенствование методов взлома требуют комплексного подхода к защите корпоративных данных. В рамках работы предполагается внедрение современных методов аутентификации и авторизации (например, OAuth2 и JWT),

шифрование передаваемой и хранимой информации с использованием SSL/TLS, а также реализация мер по защите от распространенных атак, таких как SQL-инъекции, CSRF и XSS. Регулярный аудит безопасности и мониторинг состояния системы позволят своевременно обнаруживать и устранять потенциальные угрозы.

В данной работе рассматривается разработка веб-ориентированного приложения для IT предприятия, которое будет способствовать оптимизации бизнес-процессов, улучшению коммуникации между сотрудниками и интеграции с корпоративными информационными системами, при этом обеспечивая высокий уровень безопасности и возможность масштабирования в условиях динамичного развития компании [2]. Полученные результаты могут быть использованы как основа для дальнейших исследований и внедрения инновационных решений в области разработки программного обеспечения, что способствует повышению конкурентоспособности компаний на глобальном рынке.

Образовательная платформа предназначена для внутреннего обучения сотрудников компании. Система предоставляет возможности для прохождения курсов, выполнения тестирований, загрузки учебных материалов, а также организации обратной связи и аналитики успеваемости. Для повышения масштабируемости, отказоустойчивости и оперативности обмена событиями в системе реализована модульная архитектура с использованием микросервисного подхода и интеграцией Apache Kafka как центрального брокера событий.

Для управления разработкой проекта использована методология Agile Scrum. Такой подход позволил:

- итеративно формировать и уточнять требования (Product Backlog);
- планировать спринты (Sprint Planning) с распределением задач по приоритетам;
- проводить ежедневные встречи (Daily Scrum) для оперативного обмена информацией;
- демонстрировать реализованный функционал (Sprint Review) и анализировать опыт (Sprint Retrospective).

На рисунке 1 представлена упрощённая схема рабочего процесса в рамках Agile Scrum.

Диаграмма демонстрирует итеративный цикл Scrum-процесса – от сбора требований до ретроспективы спринта, что позволяет гибко реагировать на изменения и оптимизировать разработку.

Система реализована в виде набора микросервисов, взаимодействующих через API и асинхронные события, обрабатываемые с помощью Apache Kafka. Такая архитектура обеспечивает независимое масштабирование, отказоустойчивость и возможность обработки потоковых данных для аналитики и уведомлений [3].



Рис. 1. Схема рабочего процесса Agile Scrum

Функциональная схема платформы.

Платформа реализует комплекс функциональных возможностей для внутреннего обучения сотрудников, включающий следующие модули:

- модуль управления курсам и уроками: Организация и администрирование образовательных программ;
- модуль тестирования и оценки знаний: Проведение тестов, автоматическая проверка результатов, расчёт оценок;
- модуль управления учебными материалами: Загрузка, хранение и отображение обучающих материалов (видео, документы, презентации);
- модуль обратной связи и аналитики: Сбор отзывов, проведение опросов, формирование отчетов.;
- модуль уведомлений: Асинхронная обработка уведомлений и событий с использованием Apache Kafka.

Модуль администрирования: Управление пользователями, настройка прав доступа и мониторинг активности.



Рис. 2. Функциональная схема образовательной платформы

Данная схема (рис. 2) иллюстрирует ключевые функциональные блоки платформы и их связь через центральный API Gateway. Особое внимание уделено модулю уведомлений, реализованному через Apache Kafka [4].

Схема взаимодействия между сервисами

При выполнении запроса от пользователя (например, прохождение теста или загрузка курса) происходит следующий сценарий:

Пользователь через React UI отправляет запрос.

Запрос поступает в API Gateway, где осуществляется первичная маршрутизация и аутентификация.

Запрос направляется в соответствующий микросервис (например, Test Service для прохождения теста).

Микросервис обращается к базе данных для чтения или записи данных.

Параллельно, микросервис публикует событие в Apache Kafka для уведомления других сервисов (например, Notification Service для отправки уведомлений или Feedback Service для аналитики).

Ответ возвращается через API Gateway к пользователю.

База данных PostgreSQL [5] хранит основную информацию, необходимую для работы платформы. Основные сущности включают:

User: Сведения о сотрудниках (ID, ФИО, email, роль, хэш)

Course: Образовательные курсы (ID, название, описание, дата создания).

Lesson: Уроки, входящие в состав курсов (ID, название, содержание, course_id).

Test: Тесты для оценки знаний (ID, название, длительность, course_id).

Question: Вопросы тестов (ID, текст вопроса, тип, test_id).

Answer: Ответы на вопросы (ID, текст, признак правильного, question_id).

Result: Результаты прохождения тестов (ID, оценка, дата, user_id, test_id).

Feedback: Отзывы и оценки по курсам (ID, комментарий, рейтинг, user_id, course_id).

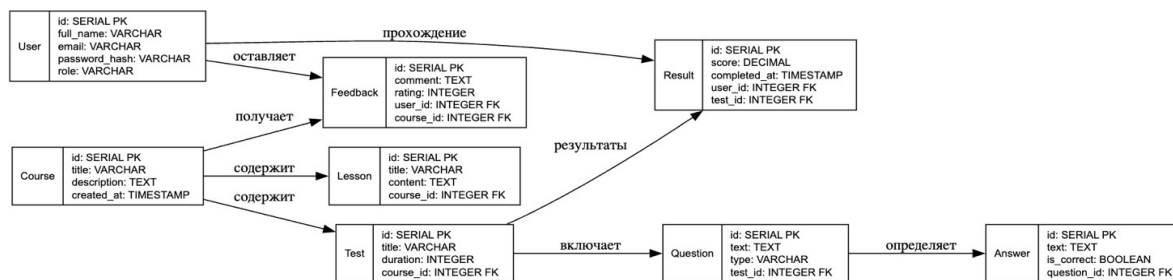


Рис. 3. Схема базы данных

Схема базы данных (рис. 3) демонстрирует основные сущности и их взаимосвязи, что обеспечивает целостность информации об обучении сотрудников.

Для автоматизации процессов сборки, тестирования, анализа покрытия кода и деплоя используется современный DevOps pipeline. Система автоматически запускает unit-тесты, интеграционные тесты и E2E-тесты, затем создаёт Docker-образы и развёртывает приложение в тестовом и продуктивном окружениях с использованием Kubernetes.

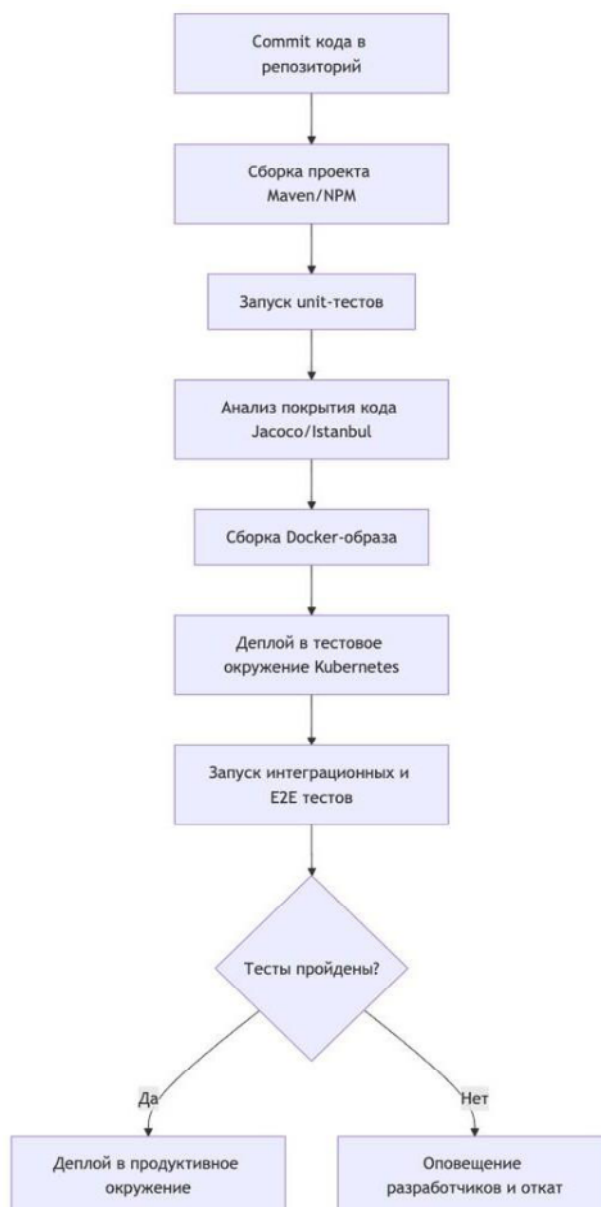


Рис. 4. Схема DevOps Pipeline

Данная диаграмма (рис. 4) отражает полный цикл автоматизации разработки, позволяющий обеспечить высокое качество кода и стабильность развёртывания.

В разработке платформы реализован комплекс функциональных модулей, обеспечивающих всестороннее внутреннее обучение сотрудников.

Анализ покрытия кода.

Использование Jacoco для Java-кода и Istanbul для JavaScript, позволяющее автоматически генерировать отчёты по покрытию тестами.

Все тестовые сценарии интегрированы в DevOps pipeline, что обеспечивает автоматический запуск тестов после каждого коммита. В случае возникновения ошибок система уведомляет разработчиков и инициирует процедуру отката, что существенно снижает риск появления критических дефектов в продуктивном окружении [6].

Описание программного продукта

Главная страница является отправной точкой для пользователей, где представлена общая информация о платформе. Здесь отображается приветственное сообщение, краткое описание возможностей (обучающие курсы, тестирование, обучающие материалы) и визуальные элементы, которые задают стилистику приложения.

Основные элементы:

Заголовок и приветствие: Большой, выразительный заголовок, приветствующий пользователей, например: «Добро пожаловать в образовательную платформу».

Краткое описание: Пара предложений, описывающих цели платформы и основные возможности для повышения квалификации сотрудников.

Изображение: Качественное изображение (например, тематическая фотография, связанная с образованием), которое помогает создать нужное настроение.

Кнопка перехода: Кнопка с ярким оформлением с текстом «Начать обучение», которая ведет напрямую на страницу с курсами. Это позволяет пользователю быстро приступить к изучению материала.

Стилистика:

Используются современные CSS-стили для создания чистого, понятного и адаптивного интерфейса. Цветовая гамма соответствует корпоративной идентичности, а кнопки имеют эффекты наведения, что делает взаимодействие с приложением более интуитивным.

Форма логина.

Содержит два поля ввода — для имени пользователя и для пароля (рис. 5). Для простоты тестового примера реализована проверка: допустим, если введено имя «admin» и пароль «password», то авторизация считается успешной.

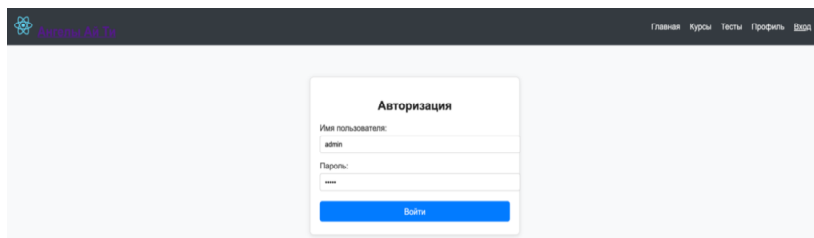


Рис. 5. Страница авторизации

Страница курсов (Courses) предоставляет пользователю список доступных образовательных курсов (рис. 6). Здесь сотрудник может выбрать интересующий курс для более детального изучения.

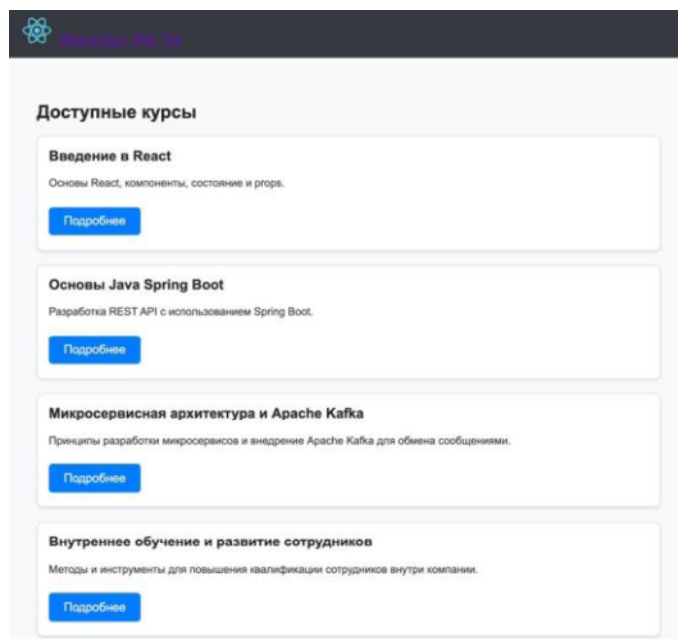


Рис. 6. Страница Курсов

Страница деталей курса (CourseDetails) показывает подробную информацию о выбранном курсе (рис. 7). Здесь пользователь может ознакомиться с содержанием курса, перечнем уроков и тем, а также получить дополнительную информацию об обучающем материале.

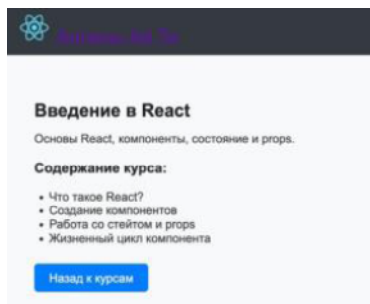


Рис. 7. Страница основной информации о курсах

Страница тестирования (TestPage) предназначена для проверки знаний сотрудников после прохождения курса (рис. 8). Здесь пользователь отвечает на вопросы теста, после чего система автоматически подсчитывает и выводит результат.

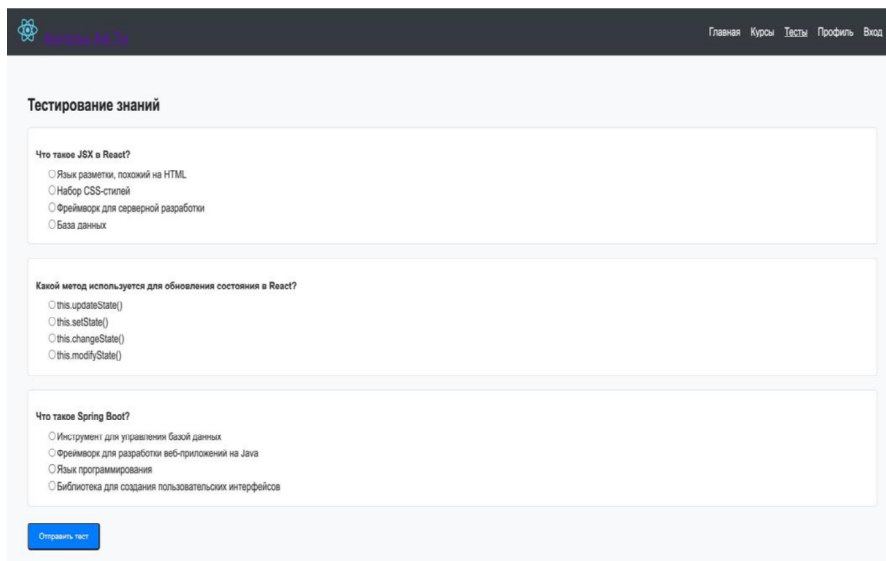


Рис. 8. Страница тестов

Страница профиля (Profile) предоставляет пользователю информацию о его учетной записи и активности на платформе (рис. 9). Здесь отображаются личные данные, а также статистика по пройденным и текущим курсам.

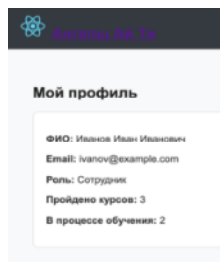


Рис. 9. Страница профиля

Каждая страница приложения создана с учётом принципов удобства пользования и современной веб-разработки. Все страницы объединяет единая стилистика: использование корпоративных цветов, единообразные кнопки, адаптивная верстка и чистый, минималистичный дизайн. Навигация между страницами организована через компонент навигационной панели (Navbar), что обеспечивает плавный переход и удобное перемещение пользователя между различными функциональными блоками платформы.

Эти страницы демонстрируют полный набор функциональных возможностей образовательной платформы, позволяя сотрудникам компании легко ориентироваться в материале, проходить тестирование и отслеживать свой прогресс. Такой подход обеспечивает не только удобство использования, но и высокую степень интеграции с корпоративными стандартами, что является важным аспектом для внутреннего обучения в современных IT-компаниях [7].

Разработанная образовательная платформа является важным инструментом для оптимизации внутренних бизнес-процессов, повышения эффективности обучения и оперативного обмена знаниями внутри компании. Система способствует созданию единой информационной среды, позволяющей не только хранить и обновлять образовательный контент, но и анализировать результаты тестирования и корректировать учебные программы в соответствии с актуальными требованиями рынка.

Библиографический список

1. Docker. Официальная документация [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.docker.com> (дата обращения: 07.01.2025).
2. Матьцина, И. А. Тестирование и оценка знаний обучающихся / И. А. Матьцина, Л. А. Коробова, Е. Н. Головина // Проблемы преподавания математики, физики, химии и информатики в ВУЗе и средней школе : Материалы IX региональной научно-методической конференции, Воронеж, 08 апреля 2023 года / Воронеж. гос. ун-т инж. технол.. – Воронеж: Воронежский государственный университет инженерных технологий, 2023. – С. 88-96. – EDN BWKITY.
3. Толстова, И. С. Разработка обучающего программного приложения с элементами геймификации / И. С. Толстова, Н. Н. Сорокина, Л. А. Коробова // Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах. – 2021. – № 1(23). – С. 104-107. – EDN IKFPZN.
4. Apache Kafka. Официальная документация. URL: <https://kafka.apache.org/documentation/> (Дата обращения: 27.01.2025).
5. PostgreSQL. Официальная документация. URL: <https://www.postgresql.org/docs/current/> (Дата обращения: 27.01.2025).
6. Гладких, Т. В. Применение видеонаблюдения для контроля товаров на складе / Т. В. Гладких, Л. А. Коробова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 1. – С. 3-9. – DOI 10.24412/2071-6168-2024-1-3-4. – EDN RCALSP.
7. Developing a learning system with gamification elements / L. Korobova, I. Tolstova, S. Chernyaeva [et al.] // Proceedings II International Scientific Conference on Advances in Science, Engineering and Digital Education (ASEDU-II-2021) : Conference Proceedings, Krasnoyarsk, 28 октября 2021 года. Vol. 2647 A. – Krasnoyarsk: AIP PUBLISHING, 2022. – P. 50012. – DOI 10.1063/5.0104273. – EDN GCDPXD.

УДК 004.415.25; ГРНТИ 20.15.13

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ АКАДЕМИЧЕСКОЙ УСПЕВАЕМОСТИ: РАЗРАБОТКА ИНТЕРАКТИВНОГО МОДУЛЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ «ЭЛЕКТРОННАЯ КАФЕДРА». АНАЛИЗ И МОНИТОРИНГ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБУЧЕНИЯ

К.В. Вышегородцев

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, kirikvyseg@gmail.com*

Аннотация. Данная работа посвящена исследованию потенциала визуализации в процессе обработки сведений об успеваемости, а также принятию решений, основанных на представленных визуальных данных. Основная цель исследования заключается в разработке интерактивного модуля для информационной системы «Электронная кафедра». Данный модуль представляет широкий спектр возможностей для анализа и мониторинга результатов обучения студентов, используя различные типы графических представлений и критерии анализа.
Ключевые слова: визуализация данных, академическая успеваемость, информационная система, интерактивный модуль, анализ данных.

VISUALIZATION OF ACADEMIC PERFORMANCE: DEVELOPMENT OF AN INTERACTIVE MODULE FOR THE «ELECTRONIC DEPARTMENTS» SYSTEM. ANALYSIS AND MONITORING OF LEARNING OUTCOMES

K.V. Vyshegorodtsev

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, kirikvyseg@gmail.com*

The summary. This paper is devoted to the study of the potential of visualization in the process of processing information about academic performance, as decision-making based on the presented visual data. The main purpose of the research is to develop an interactive module for the Electronic Department information system. This module provides a wide range of opportunities for analyzing and monitoring student learning outcomes using various types of graphical representations and analysis criteria.
Keywords: data visualization, academic performance, information system, interactive module, data science.

В современном обществе человек постоянно сталкивается с необходимостью обработки больших объемов информации. В связи с этим возрастает потребность в разработке инструментов, основанных на визуализации данных, которые значительно повышают эффективность передачи и восприятия информации. Визуальные представления не только упрощают и ускоряют процесс анализа данных, но и позволяют решать аналитические задачи в более короткие сроки.

Образовательная сфера также сталкивается с подобными вызовами. При работе с данными об успеваемости студентов возникает сложность из анализа, обусловленная большим объемом информации и высокой интенсивностью ее получения. Кроме того, часто возникают ситуации, когда временные ресурсы ограничены, и необходимо оперативно принимать решения для выполнения поставленных задач.

В таких условиях интерактивное представление данных становится особенно важным. Визуальные инструменты позволяют выявлять тенденции, делать выводы из информации и принимать обоснованные решения в сжатые сроки.

Таким образом, предлагается разработанный интерактивный модуль для системы «Электронная кафедра». Данный модуль включает в себя функции предварительной обработки данных и их анализа.

Выбор метрик для визуализации данных

Эффективное использование методов интеллектуального анализа данных связано с решением множества вопросов, включая определение критериев успеха студентов, выбор показателей и методов анализа. Чтобы выбрать подходящий способ визуализации, важно четко определить, какие данные должны быть отображены на графике. Одними из ключевых метрик являются успеваемость студента по каждой работе в течение семестра и итоговые оценки за экзамены. Это требует выбора подходящего метода визуализации, способного наглядно представить как индивидуальные достижения студента, так и общие тенденции успеваемости в группе.

Выбор вида графического представления

Выбор подходящего типа визуализации играет ключевую роль в эффективности передачи информации, так как каждый вид диаграммы или графика предназначен для решения определенных задач. На основании исследований, представленных в работах [1], [3] было принято решение использовать различные методы визуализации успеваемости:

- диаграмма области;
- линейный график;
- круговая диаграмма;
- диаграмма рассеивания;
- гистограмма;
- тепловая карта.

Для оценки общей успеваемости студенческих групп на протяжении обучения используется диаграмма областей, представляющая собой линейные графики с заполненным пространством под линией. Горизонтальная ось отражает номер семестра, а вертикальная – средний балл в зачетной книге. Каждая группа представлена своей областью с уникальным цветом. Эта визуализация позволяет быстро сравнить динамику успеваемости разных групп.

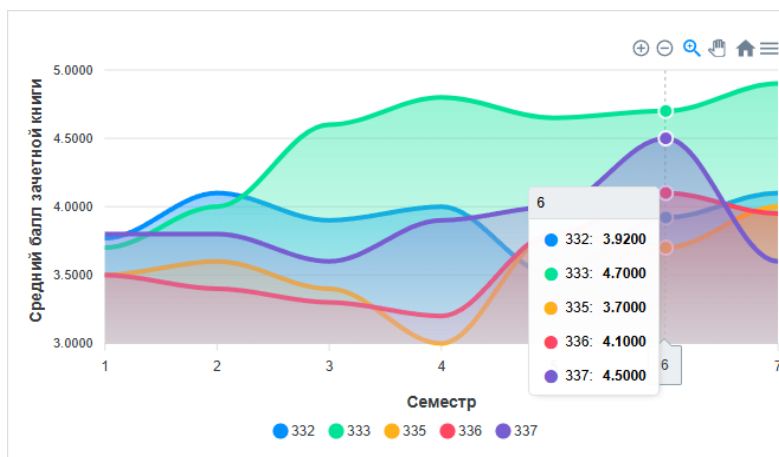


Рис. 1. Пример диаграммы областей

Круговая диаграмма предназначена для представления пропорционального распределения успеваемости в группах. Каждый сектор круга представляет процентное содержание неуспевающих студентов в соответствующей группе.

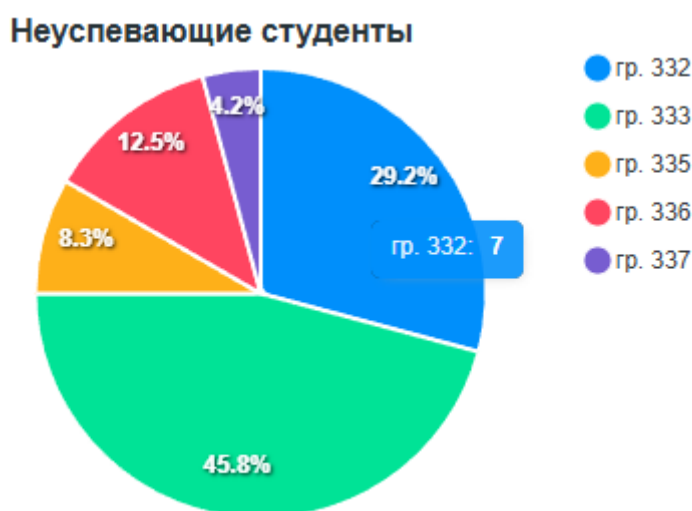


Рис. 2. Пример диаграммы областей

График (линейный) используется для отслеживания академической траектории конкретного студента. По горизонтальной оси отложены номера семестров, а по вертикальной – средний балл в зачетной книге за каждый семестр. Линия, соединяющая точки отражает динамику успеваемости студента на протяжении учебного периода.

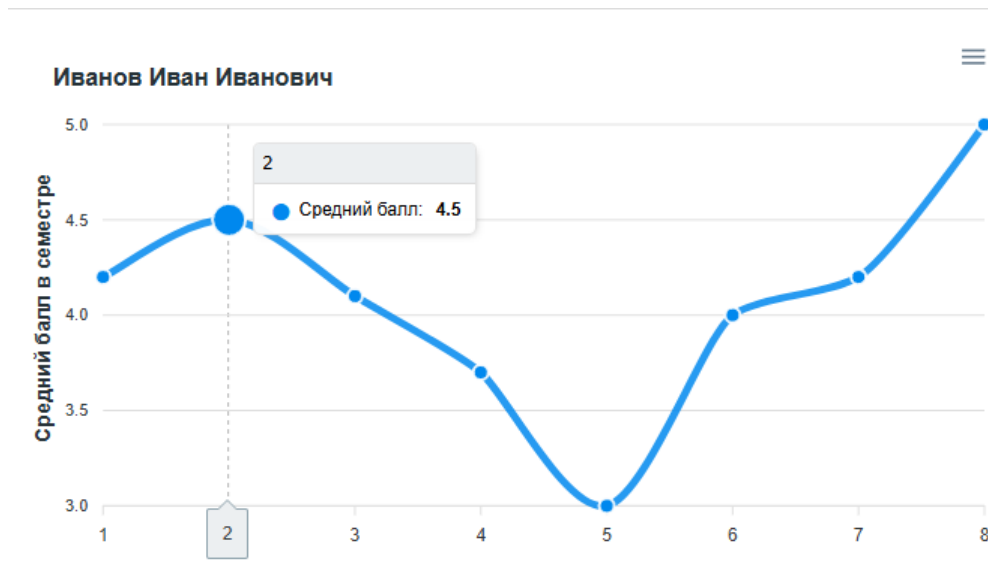


Рис. 3. Пример линейного графика

С целью сравнения успеваемости студентов в различных группах и по разным дисциплинам была построена гистограмма. Ось x – средний балл по одному из предметов, ось y – номер студенческой группы.

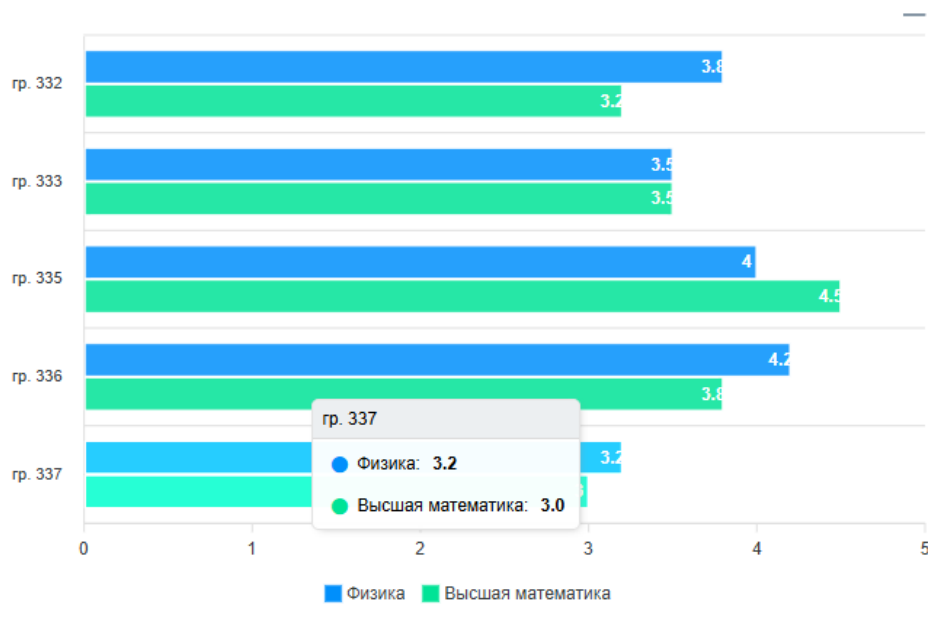


Рис. 4. Пример горизонтальной гистограммы для сравнения среднего балла по физике и высшей математике в группах

Тепловая карта хорошо подходит для отображения разницы между значениями, отображая пиксели разным цветом. Данная тепловая карта построена следующим образом: по оси X расположены студенты, по оси Y – лабораторные работы, а степень отклонения от графика сдачи по каждой работе определяется цветом пикселя, где красный – не сдано, желтый – сдано не в срок, зеленый – сдано вовремя.

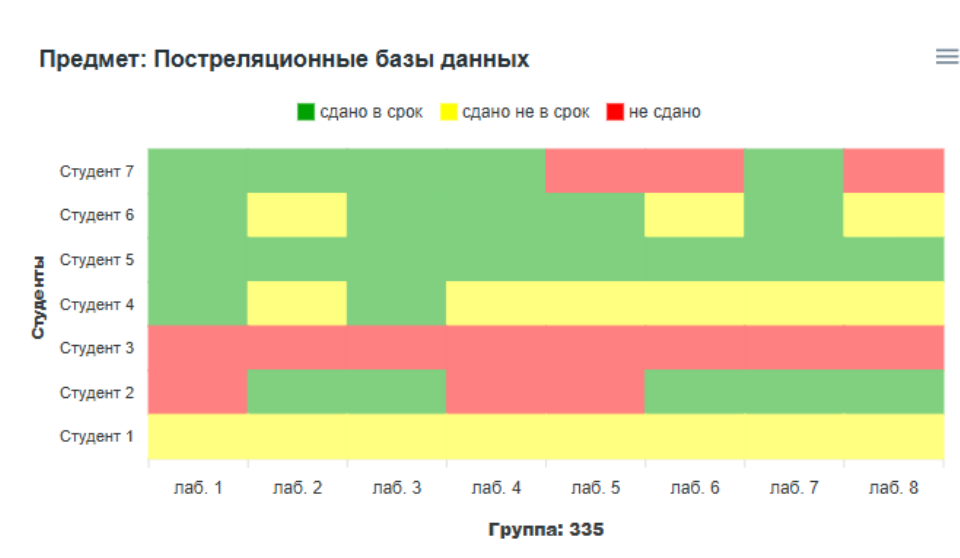


Рис. 5. Пример тепловой карты

Диаграмма рассеяния демонстрирует взаимосвязь между первоначальным академическим потенциалом студента и его последующей успеваемостью. Сумма баллов ЕГЭ, определяющая порог поступления отображается по горизонтальной оси, а итоговый средний балл в зачетной книге – по вертикальной. Пиксели на графике наглядно показывают, как входные данные соотносятся с результатами обучения.

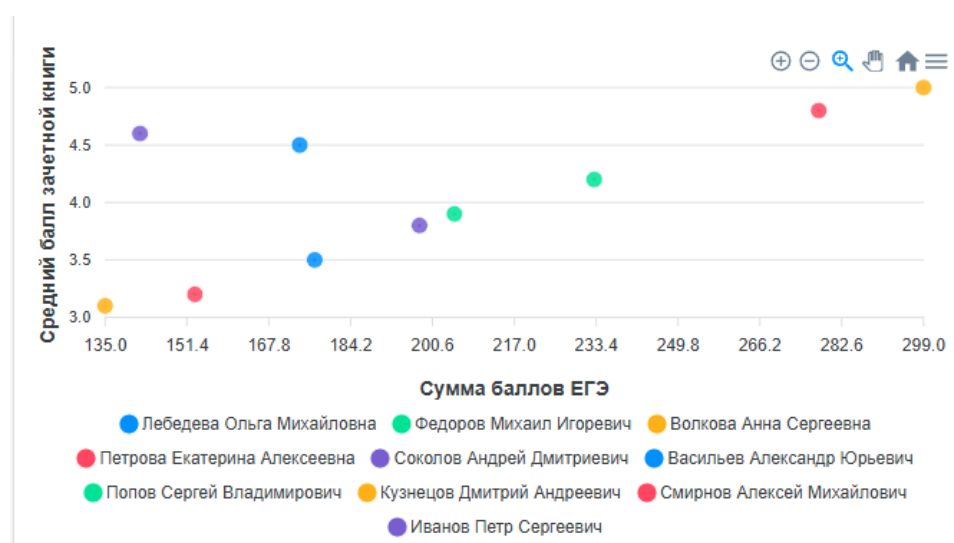


Рис. 6. Пример диаграммы рассеяния

Функциональные требования к модулю визуализации и анализа успеваемости студентов

Разрабатываемый интерактивный модуль для системы «Электронная кафедра» должен обладать следующим функционалом на основе спецификации имеющихся данных:

- анализ академической успеваемости (автоматизированное определение степени отклонения студентов от установленного графика сдачи практических работ);
- визуализация результатов (Наглядное отображение обработанных данных об успеваемости);

– генерация отчетности (формирование структурированных отчетов об успеваемости, предназначенных для сохранения и печати);

Для реализации модуля была определена архитектура веб-приложения (клиент-сервер). В качестве программной платформы был выбран ХААМР, интегрирующий в себе Apache-сервер для обработки HTTP-запросов, СУБД MySQL для хранения данных, и язык PHP [2] для реализации серверной логики. Для обеспечения взаимодействия с базой данных используется библиотека PHP Data Object (PDO). Визуализация успеваемости реализована с использованием JavaScript-библиотеки ApexCharts. Пользовательский интерфейс модуля разработан с применением технологий HTML и CSS, обеспечивающих современный и удобный для пользователя опыт.

Библиографический список

1. Желязны Д. Говори на языке диаграмм / Д. Желязны – М.Манн, Иванов и Фербер, 2007. - 320с.
2. Клышинский Э.С. Обзор методов визуализации многомерных данных / Э.С. Клышинский, С.В. Рысаков, А.И. Шихов // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. – 2014. – №17. - с.519-530
3. Robin Nixon. Learning PHP, MySQL&JavaScript: A step-by-Step Guide to Creating Dynamic Websites. – O'Reilly Media, 2025. - 1114с..

УДК 616.15-07; ГРНТИ 76.13.15

ОБРАБОТКА СИГНАЛА ЭКГ ПРИ ПОМОЩИ ЯЗЫКА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ HASKELL

И.С. Репин

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

Аннотация. В данной работе представлена программа для анализа модельного сигнала ЭКГ на языке Haskell. Программа реализует алгоритм автоматического выявления R-зубцов в сигнале, вычисления длительности RR-интервалов и анализа частоты сердечных сокращений. Входные данные загружаются из файла, после чего выполняется обработка сигнала: поиск локальных максимумов с амплитудой выше заданного порога и расчет временных промежутков между ними. Результаты могут быть использованы для оценки сердечного ритма и выявления возможных нарушений, таких как аритмия. Работа демонстрирует возможности языка функционального программирования для анализа биомедицинского сигнала.

Ключевые слова: электрокардиограмма (ЭКГ), R-зубцы, RR-интервалы, сердечный ритм, язык Haskell, функциональное программирование, обработка данных.

ECG SIGNAL PROCESSING USING HASKELL FUNCTIONAL PROGRAMMING LANGUAGE

I.S. Repin

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

The summary. This paper presents a program for analyzing a model ECG signal in the Haskell language. The program implements an algorithm for automatically detecting R-waves in a signal, calculating the duration of RR intervals, and analyzing heart rate. The input data is loaded from the file, after which the signal is processed: the search for local maxima with an amplitude above a given threshold and the calculation of the time intervals between them. The results can be used to assess the heart rate and identify possible disorders such as arrhythmia. The work demonstrates the capabilities of a functional programming language for analyzing biomedical signals.

Keywords: electrocardiogram (ECG), R-waves, RR intervals, heart rate, Haskell language, functional programming, data processing.

В работе поставлена задача обосновать возможности использования языка функционального программирования HASKELL [1, 2] при обработке биомедицинских сигналов, в частности сигнала ЭКГ.

HASKELL — это строго типизированный, чисто функциональный язык программирования, названный в честь американского математика Хаскелла Карри. HASKELL известен своей выразительностью, безопасностью и мощными абстракциями, которые делают его достойным для задач, требующих высокой надежности и математической строгости.

Следует отметить преимущества языка функционального программирования HASKELL:

- Отложенные вычисления.

Вычисления производятся только тогда, когда их результаты действительно необходимы. Это позволяет работать с большими объёмами данных и оптимизировать выполнение программ, избегая ненужных вычислений.

- Сильная статическая типизация.

Типы в HASKELL проверяются на этапе компиляции, что позволяет выявлять многие ошибки до выполнения программы.

- Мощные абстракции.

HASKELL предоставляет мощные инструменты для работы с абстракциями, например, реализация монад. Эти конструкции позволяют эффективно управлять асинхронными вычислениями и другими сложными аспектами программирования.

- Поддержка параллельного и распределенного программирования

Благодаря отложенным вычислениям, HASKELL хорошо подходит для параллельного программирования. Многие задачи могут быть легко распараллелены без необходимости внесения значительных изменений в код.

Для проведения исследования в пакете Mathcad был сформирован модельный сигнал (рис. 1) на основе функций Гаусса. Амплитуды зубцов P, Q, R, S и T были выбраны равными соответственно 1 В, 0,25 В, -0,1 В, -0,2 В и 0,3 В, что соответствует среднестатистическому ЭКГ сигналу. Период повторения взят равным 0,8 с, что соответствует частоте сердечных сокращений 75 ударов в минуту. Для большей реалистичности к исходному сигналу был добавлен шум с нормальным законом распределения и среднеквадратическим отклонением 0,02 В. Модельный сигнал был представлен дискретными отсчетами с периодом дискретизации 1 мс.

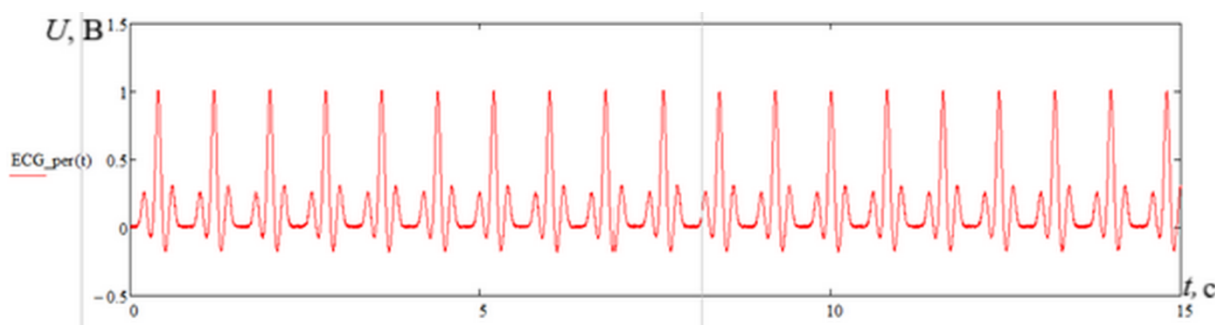


Рис. 1. Модельный сигнал ЭКГ

Обработка исходного сигнала предполагает выполнение следующих операций:

- Чтение данных ЭКГ из файла.
- Обнаружение R-зубцов в сигнале.
- Вычисление длительностей RR-интервалов между смежными R-зубцами.
- Вычисление средней длительности RR-интервалов.
- Форматированный вывод данных.

- Вывод в консоль номера интервала, временного ряда RR-интервалов и средней длительности RR-интервалов.

На рисунке 2 приведена блок-схема алгоритма обработки сигнала ЭКГ.

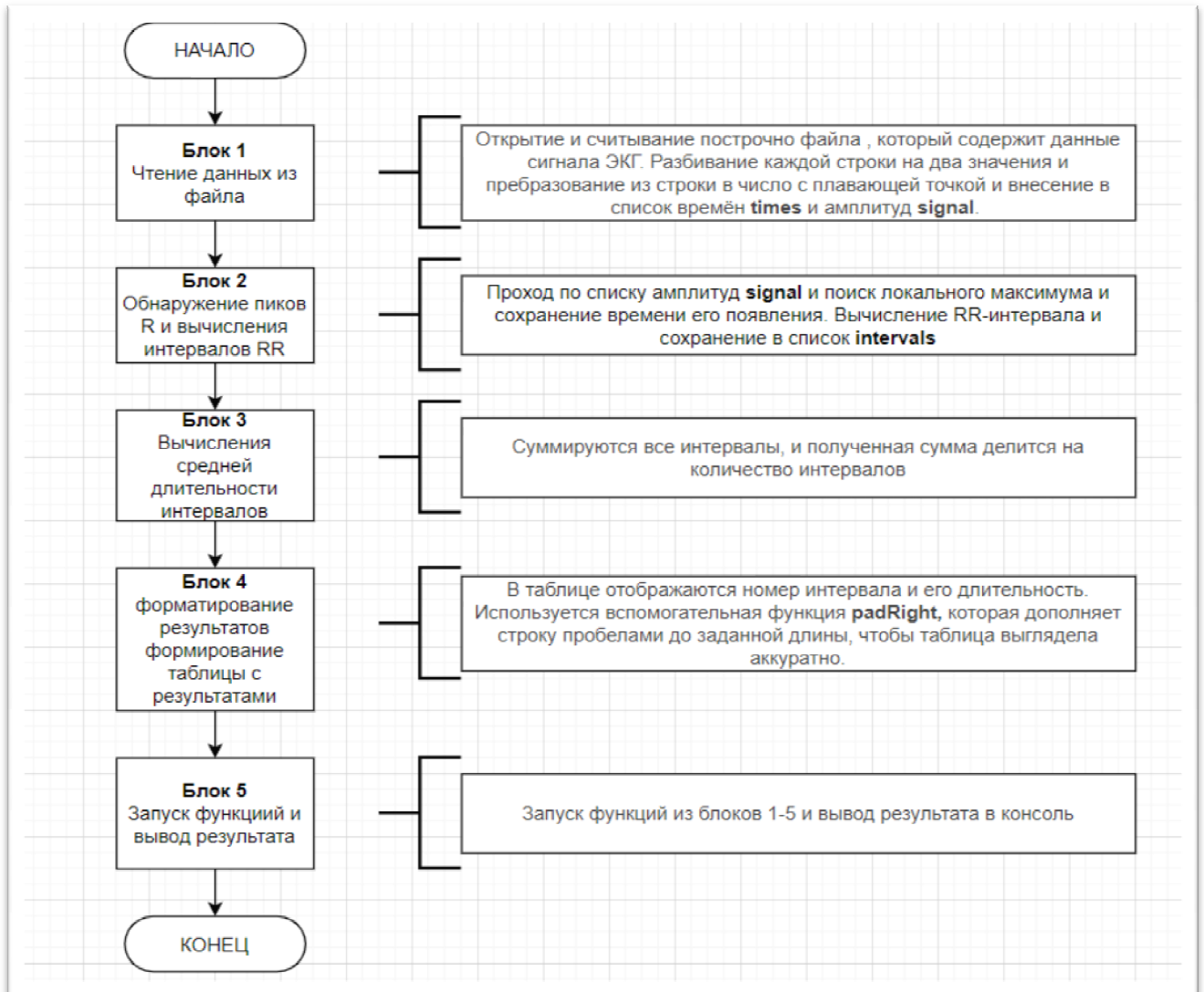


Рис. 2. Блок-схема алгоритма обработки сигнала ЭКГ.

Описание работы алгоритма

Блок 1: Чтение данных из файла.

- Программа открывает файл `ECG_dis.hs`, который содержит данные сигнала ЭКГ. Файл читается построчно, и каждая строка разделяется на два значения: время (t) и амплитуду (a). Эти значения изначально представлены в виде строк.
- После разделения строки на время и амплитуду, программа преобразует эти значения из строкового формата в числа с плавающей точкой (`Double`). Это необходимо для дальнейшей математической обработки данных.
- Программа возвращает два списка, используемых в последующих этапах обработки [1]: `times` — список временных меток, соответствующих каждому отсчету сигнала и `signal` — список амплитуд сигнала в соответствующие моменты времени.

Блок 2: Обнаружение R-зубцов и вычисление RR-интервалов.

- Программа проходит по списку амплитуд `signal` и ищет локальные максимумы, которые соответствуют R-зубцам. Локальный максимум определяется как точка, где амплитуда превышает заданный порог (0.7 В) и является наибольшей среди соседних точек.
- Когда программа обнаруживает R-зубец, она сохраняет время его появления из списка `times`. Это время используется для вычисления интервалов между соседними R-зубцами.
- Для каждого обнаруженного R-зубца программа вычисляет интервал между ним и предыдущим R-зубцом. Этот интервал есть RR-интервал и представляет собой разницу во времени между двумя соседними R-зубцами. Все RR-интервалы сохраняются в списке `intervals`.
- Вспомогательная функция `isLocalMax` проверяет, является ли текущая точка локальным максимумом. Она сравнивает текущую амплитуду с амплитудой соседней точки и возвращает `True`, если текущая точка является максимумом.

Блок 3: Вычисление средней длительности RR-интервалов.

- Функция `averageInterval` принимает список RR-интервалов и вычисляет их среднее значение. Для этого программа суммирует все интервалы и делит полученную сумму на количество интервалов. Среднее значение RR-интервалов позволяет оценить среднюю частоту сердечных сокращений.

Блок 4: Форматированный вывод результатов.

- Функция `printIntervalsTable` выводит результаты обработки в виде таблицы. В таблице отображаются номер интервала и его длительность. Для форматирования таблицы используется вспомогательная функция `padRight`, которая дополняет строку пробелами до заданной длины, чтобы таблица выглядела аккуратно.
- Функция `padRight` принимает строку и дополняет её пробелами справа до заданной длины. Это необходимо для выравнивания столбцов в таблице.

Блок 5: Основная функция.

- Основная функция `main` [2] начинает работу с загрузки данных ЭКГ из файла при помощи функции `readECGData`. Данные разделяются на два списка: `signal` (амплитуды) и `times` (временные метки).
- Затем программа вызывает функцию `detectPeaks`, которая проходит по списку амплитуд, находит R-зубцы и вычисляет RR-интервалы. Результаты сохраняются в списке `intervals`.
- Программа вычисляет среднее значение RR-интервалов с помощью функции `averageInterval`.
- В самом конце программа выводит таблицу с номерами интервалов и их длительностью и также среднее значение RR-интервалов.

Для реализации алгоритма была разработана программа на языке Haskell и протестирована работоспособность отдельных ее фрагментов.

Полученные результаты позволяют говорить о возможности применения этого языка для автоматизации обработки ЭКГ-сигнала, используя стандартные функции Haskell без сложных библиотек.

Библиографический список

1. Programming in Haskell Second Edition GRAHAM HUTTON, University Printing House, Cambridge CB2 8BS, United Kingdom - 272 с.
2. Real World Haskell by Bryan O'Sullivan, John Goerzen, and Don Stewart Copyright 2009 Bryan O'Sullivan, John Goerzen, and Donald Stewart. Printed in the United States of America. - 712 с.

УДК 519.876.2:004.62:620.179.152; ГРНТИ 50.47.31

МОДЕЛИРОВАНИЕ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ И СТРУКТУР ДАННЫХ ДЛЯ РАБОТЫ С РЕЗУЛЬТАТАМИ РАДИАЦИОННОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

А.В. Сударев¹, Е.Е. Ковшов^{1,2}

¹Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева,
Российская Федерация, Москва, a_sudarev2002@mail.ru

²Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторский институт монтажной технологии –
Атомстрой»,
Российская Федерация, Москва

Аннотация. Рассмотрены модели бизнес-процессов обработки и использования результатов радиационного неразрушающего контроля. Проведен рефакторинг бизнес-процессов обработки и использования данных, построены диаграммы AS-IS и TO-BE. Представлены существующие способы хранения и структурирования полученных результатов. Построена ER-модель структуры данных для использования результатов радиационного неразрушающего контроля, проведен вычислительный эксперимент для определения ее эффективности.

Ключевые слова: радиационный неразрушающий контроль, DICONDE, бизнес-процессы, PACS, структуры данных

BUSINESS PROCESSES AND DATA STRUCTURES MODELING FOR THE RADIATION NONDESTRUCTIVE EVALUATION DATA SETS INTERACTION

A.V. Sudarev¹, E.E. Kovshov^{1,2}

¹D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology,
Russia, Moscow, a_sudarev2002@mail.ru

²JSC "Research and Development Institute of Construction Technology – Atomstroy",
Russia, Moscow

The summary. Business process models for processing and utilizing radiographic non-destructive testing results were explored. The data processing and utilization business processes were refactored, and AS-IS and TO-BE diagrams were developed. Existing storage and structuring methods for the results are presented. An ER model for the data structure used in radiographic non-destructive testing results was built, and a computational experiment was conducted to assess its effectiveness.

Keywords: radiographic non-destructive testing, NDT, NDE, DICONDE, business processes, PACS, data structures

Введение

Согласно ГОСТ Р 56542-2019 [1] к основным видам неразрушающего контроля (Non-destructive testing – NDT) можно отнести: радиационный, ультразвуковой, визуальный и измерительный, контроль проникающими веществами. Выбор вида и метода зависит от особенностей объекта контроля и используемого технологического оборудования. Основной проблемой различных видов неразрушающего контроля является отсутствие структур данных для эффективной работы с их результатами (Non-destructive evaluation – NDE). Из-за технологических особенностей предприятий и используемых ими методов NDT, при сборе и архивировании результатов контроля приоритет отдается формату открытых структурированных данных – DICONDE (Digital Imaging and Communication in Nondestructive Evaluation). Данный формат разработан компанией ASTM International (American Society for Testing and Materials) в 1999 году и подробно описан в соответствующем стандарте [2]. Концепция и структура файлов указанного выше формата были унаследованы из зарекомендовавшего себя и широко применяемого в медицине формата DICOM [3], который, в том числе, используется для хранения результатов лучевых исследований систем и органов организма человека. Оба формата имеют схожую иерархическую структуру (рис. 1), но различаются тегами для хранения фактографической информации (метаданных).

При более общем рассмотрении, формат DICONDE состоит из полихроматического растрового изображения и метаданных, прикрепленных к нему в виде тегов. Благодаря подобной структуре, можно исследовать один компонент при разных условиях в разных временных промежутках, а стандартизация и единство тегов позволяют использовать указанный формат вне зависимости от вида контроля, применяемого технологического оборудования и особенностей конкретного предприятия.

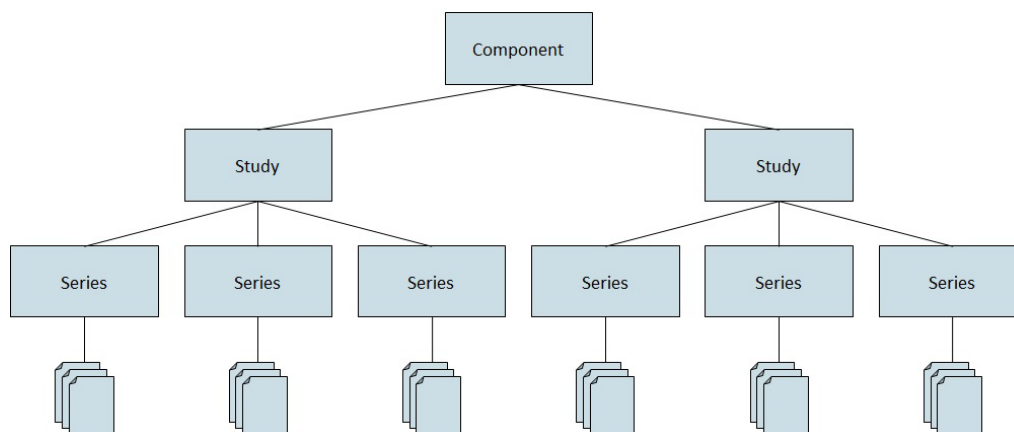


Рис. 1. Фрагмент структуры файлов DICONDE

Постановка задачи исследования

Для архивирования результатов NDT, используется система PACS (Picture Archiving and Communication System – Система архивирования и передачи изображений), объединенная с RIS (Radiology Information System – Радиологическая информационная система). Результаты лучевых исследований хранятся в PACS, а управление потоками информации осуществляется с помощью RIS. Несмотря на популярность PACS в области медицины [4], основная проблема использования данной архитектуры для хранения и архивирования результатов NDT заключается в невозможности осуществлять поиск необходимых записей по определенным атрибутам, поскольку существуют значительные ограничения при выполнении сложных запросов. Для избавления от этих недостатков, совместно с PACS устанавливается система управления базами данных (СУБД) и формируется внешняя база данных, позволяющая строить сложные запросы на выборку и содержащая атрибуты, по которым требуется осуществлять поиск данных, хранящихся в PACS (рис. 2).

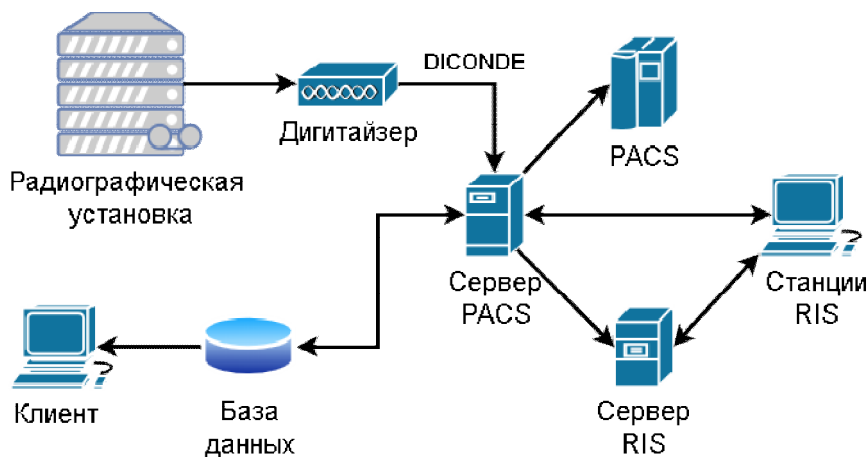


Рис. 2. Схема передачи информации в PACS&RIS системе с внешней базой данных

На примере радиационного метода неразрушающего контроля рассмотрим бизнес-логику процесса хранения и соответствующей ей структуру данных, которая обеспечивает эффективное получение результатов на этапе NDE.

Моделирование бизнес-логики процесса хранения результатов NDE

Для моделирования бизнес-логики используем семейство методологий проектирования IDEF [5]. В соответствии с методологией IDEF0 для оптимизации различных бизнес-процессов составляется 2 вида схем (диаграмм) – модель AS-IS, описывающая существующие бизнес-процессы предприятия, и модель TO-BE, отражающая желаемое целевое состояние. Сравнение моделей AS-IS и TO-BE позволяет выявить узкие места в существующих процессах и разработать план перехода к более эффективной организации работы. Методология IDEF0 предполагает создание иерархической системы диаграмм, каждая из которых описывает систему на определенном уровне детализации [5].

Модель AS-IS (рис. 3) сформирована согласно [6, 7]. Специалист по неразрушающему контролю вынужден проводить инспекцию для каждого полученного с сенсоров изображения, после чего они поступают на хранение в PACS. Ввиду ранее описанных проблем запросов к PACS, использование результатов NDT ограничено. Помимо использования данных по их прямому назначению, формирование унифицированной структуры данных позволит получить значительные преимущества в долгосрочной перспективе при повторном использовании наборов данных, что существенно превосходит текущий технологический уровень в машиностроительной отрасли. Станет возможным использование результатов NDT для машинного обучения и систем искусственного интеллекта [8, 9]. На основе этих данных можно оптимизировать существующие бизнес-процессы и создать новые возможности для развития бизнеса.

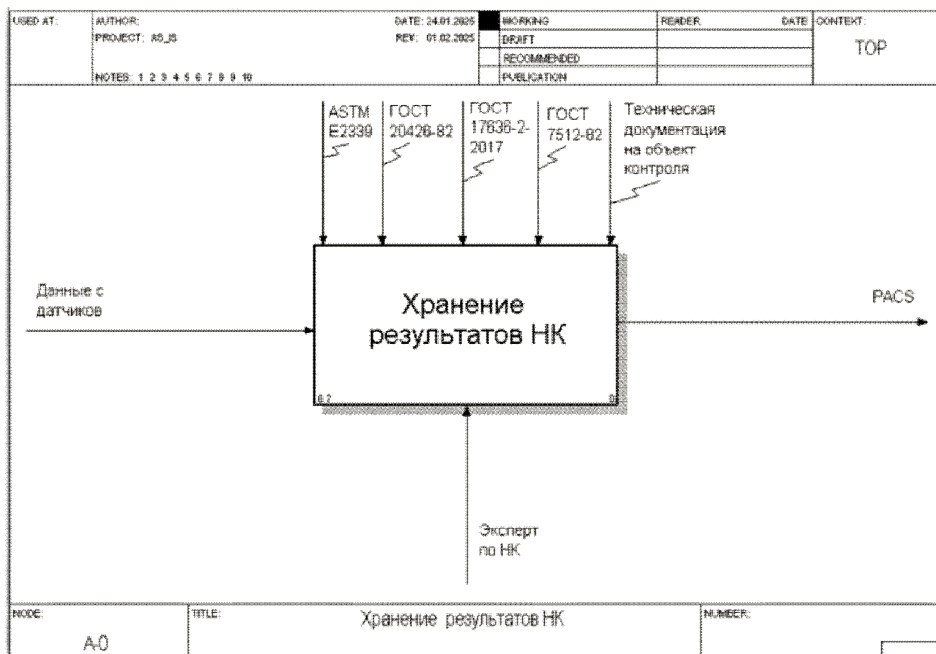


Рис. 3. Контекстная диаграмма AS-IS модели

Согласно модели TO-BE (рис. 4), данные проходят несколько стадий перед записью в базу данных, интегрированную с PACS. На первом этапе используется бинарный классификатор для автоматического исключения из рассмотрения бездефектных радиографических изображений (рентгенограмм), поскольку они не представляют информационной ценности. Бездефектные изображения автоматически вносятся в PACS со всеми сформированными те-

гами. Так как количество таких изображений преобладает в общей массе получаемых изображений, данное изменение позволит специалисту по неразрушающему контролю тратить на расшифровку рентгенограмм гораздо меньше времени и ресурсов. Вторым этапом является автоматическое создание разметки для изображений, содержащих различные дефекты объекта контроля. Для этого используется алгоритм разметки изображений. Разметка предназначена для локализации дефектов на рентгенограмме путем создания одной или нескольких областей интереса (Region of Interests – ROI). Параметры области интереса задаются в соответствии с [2]. Границы ROI описываются массивом точек и записываются в теге (0070, 0022) Indication ROI Contour Data. Тип геометрии ROI указывается в теге (0070, 0023) Indication ROI Geometric Type. Для организации информации о нескольких ROI на одном изображении может использоваться тег (0014, 201E) Indication ROI Sequence. Затем результат работы алгоритма разметки изображений проверяется специалистом по неразрушающему радиационному контролю. Специалист также расшифровывает радиографический снимок и вносит в теги информацию об обнаруженных видах дефектов согласно [6]. После этого изображение сохраняется в PACS и, при наличии необходимых тегов, записывается в БД.

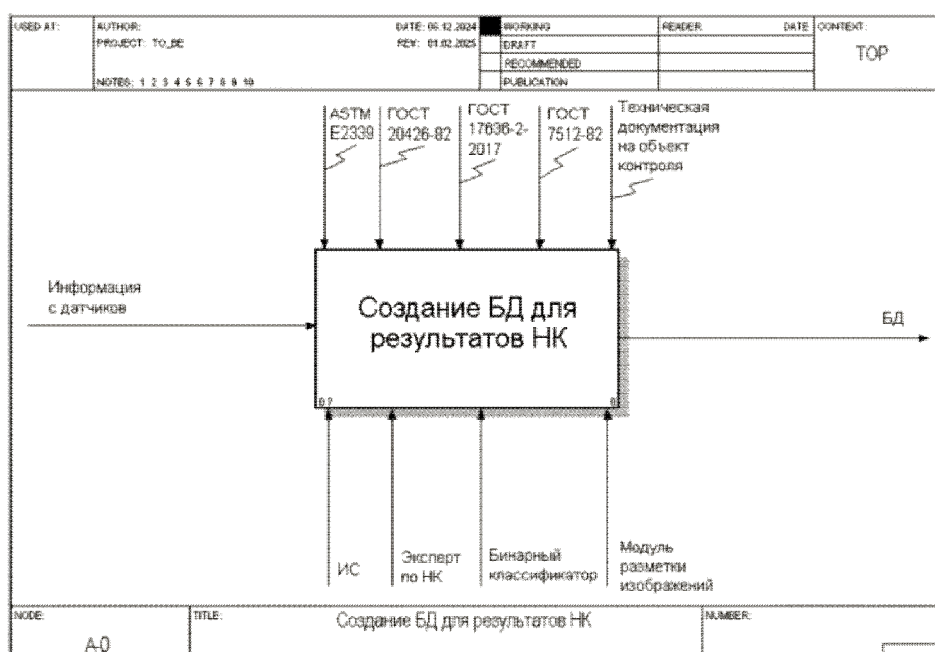


Рис. 4. Контекстная диаграмма TO-BE модели

Моделирование структуры данных для хранения результатов NDE

При моделировании базы данных (БД) для хранения и повторного использования результатов NDE была выбрана реляционная модель. Структура разработанной логической модели БД представлена на рисунке 5.



Рис. 5. Структура логической модели БД для хранения результатов NDE

Учитывая структуру файлов DICONDE, в качестве сущностей реляционной БД выбраны иерархические единицы DICONDE – Component, Study, Series, Instance. Эта структура БД позволяет вносить информацию об атрибутах, которые не позволяют формировать поисковые запросы в PACS. После генерации выборки записей, удовлетворяющих критериям запроса, БД формирует путь к каждой из них в PACS, используя уникальные идентифицирующие номера (UID) [10].

Для проверки эффективности предложенной модели БД, был проведен вычислительный эксперимент (рис. 6). Для его реализации использовался инструмент для визуального проектирования баз данных – MySQL Workbench 8.0 [11]. Заполнение таблиц БД производилось случайным образом с помощью языка Python и API системы управления базами данных MySQL 8.0. Таблица Object, в которой каждая запись соответствует одному измерению, содержит 10^6 записей.

В ходе эксперимента оценивались время выполнения запроса и его стоимость, которая представляет собой величину, характеризующую время выполнения запроса с точки зрения оптимизатора SQL-сервера. Стоит отметить, что стоимость запроса, в первую очередь, отражает потребляемое количество ресурсов при выполнении запроса, а не его фактическое время выполнения [12].

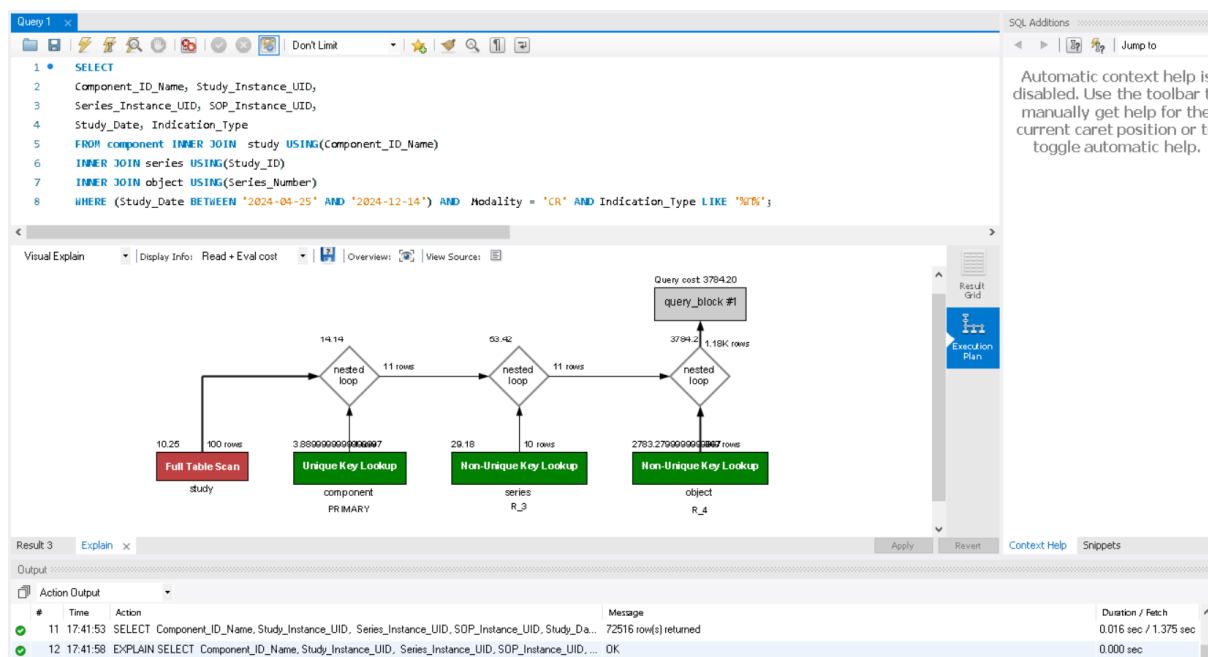


Рис. 6. Время выполнения, стоимость и план запроса на выборку по дате, модальности и типу дефекта «пора»

Результаты проведенного вычислительного эксперимента показали, что время выполнения запроса составило всего 0.016 секунды, при относительной величине стоимости запроса 3784.2. Несмотря на то, что основной вклад в стоимость запроса вносит операция присоединения таблицы Object, содержащей достаточно большое число записей (10^6), высокая скорость выполнения запроса позволяет предположить, что разработанная архитектура обеспечивает эффективный доступ к данным. Этот вывод также косвенно подтверждается тем, что стоимость полного построчного сканирования таблицы, содержащей 72516 строк (количество выведенных строк), составляет 7432.9, что указывает на эффективную работу БД.

Заключение

Проведенный рефакторинг бизнес-модели процесса хранения и обработки результатов NDT позволил сформулировать требования к необходимой структуре данных для решения поставленной задачи. Вычислительный эксперимент подтвердил эффективность разработанной структуры данных, однако стоит отметить необходимость тестирования на больших объемах данных, либо в реальных условиях машиностроительного производства. Благодаря тесной интеграции структуры БД с форматом DICONDE (тегами), предложенное и апробированное решение может быть адаптировано для использования с другими видами и методами неразрушающего контроля путем изменения структуры используемой базы данных.

Библиографический список

- ГОСТ Р 56542-2019. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. – Введ. 2019-12-19. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 19 с.
- ASTM E2339-21. Standard Practice for Digital Imaging and Communication in Nondestructive Evaluation (DICONDE). – West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2021. – 36 p.
- Clunie D. A. DICOM structured reporting. – PixelMed publishing, 2000.
- Huang H. K. Short history of pacs. part i: Usa //European journal of radiology. – 2011. – Vol. 78. – №. 2. – pp. 163-176.
- Маклаков С. В. ВРwin и ERwin. CASE-средства разработки информационных систем //М.: Диалог-мифи. – 2001.
- ГОСТ 7512-82. Контроль неразрушающий. Сварные соединения. Радиографический метод. – Москва : Издательство стандартов, 1982. – 28 с.

7. ГОСТ ISO 17636-2-2017. Контроль неразрушающий сварных соединений. Радиографический контроль. Часть 2. Методы рентгенографии и гамма-графического контроля с применением цифровых детекторов. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 24 с.

8. Корчагин В. Д., Кувшинников В. С., Ковшов Е. Е. Критериальный анализ моделей обработки данных радиационного неразрушающего контроля // International Journal of Open Information Technologies. – 2024. – Т. 12. – №. 4. – С. 23-31.

9. Косач А. А., Ковшов Е. Е. Автоматизация обработки данных неразрушающего контроля на основе искусственной нейронной сети // Cloud of science. – 2018. – Т. 5. – №. 3. – С. 524-531.

10. Leinenbach F. et al. Information reuse of nondestructive evaluation (NDE) data sets // Journal of Sensors and Sensor Systems. – 2024. – Vol. 13. – №. 1. – pp. 99-108.

11. MySQL Workbench 8.0 Reference Manual / Oracle. — URL: <https://dev.mysql.com/doc/workbench/en/> (дата обращения: 06.02.2025). – Текст : электронный.

12. What does cost of SQL statement mean? / [Электронный ресурс] // stackoverflow.com : [сайт]. – URL: <https://stackoverflow.com/questions/19535570/what-does-cost-of-sql-statement-mean> (дата обращения: 02.02.2025).

УДК 532.5:004.946; ГРНТИ 29.03.77

СИМУЛЯЦИЯ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ В КАПИЛЛЯРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ

А.А. Молчанова

Мытищинский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»,

Российская Федерация, Мытищи, alyonamolchanova608@gmail.com

Аннотация. Представлен подход к исследованию и визуализации движения жидкости в капилляре с использованием технологий виртуальной реальности. Статья включает теоретические основы капиллярного движения и методы симуляции, а также обсуждение практических приложений данной технологии. Особое внимание уделено инновационным подходам и перспективам использования виртуальной реальности в научных исследованиях. Отмечается, что VR-тренажеры могут быть использованы в образовательных целях для наглядной демонстрации принципов капиллярности и для проведения интерактивных экспериментов, а также создадут условия для безопасного и эффективного обучения и снизят стоимость обучения.

Ключевые слова: цифровые компьютерные технологии, VR-технологии, капиллярность, симуляция движения жидкости, цифровые двойники.

SIMULATION OF FLUID MOVEMENT IN A CAPILLARY USING VIRTUAL REALITY TECHNOLOGY

A.A. Molchanova

*Mytishchi Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
"Bauman Moscow State Technical University (National Research University)",
Russian Federation, Mytishchi, alyonamolchanova608@gmail.com*

The summary. This paper presents an approach to the study and visualization of fluid movement in a capillary using virtual reality technologies. The article includes the theoretical foundations of capillary motion and simulation methods, as well as a discussion of practical applications of this technology. Special attention is paid to innovative approaches and prospects of using virtual reality in scientific research. It is noted that VR simulators can be used for educational purposes to visually demonstrate the principles of capillarity and to conduct interactive experiments, and will create conditions for safe and effective learning and reduce the cost of training.

Keywords: digital computer technologies, VR technologies, capillarity, fluid motion simulation, digital twins.

В последние годы наблюдается значительный интерес к исследованию процессов, связанных с движением жидкостей в микроструктурах, особенно капилляров [1]. Капиллярность – явление изменения уровня жидкости (подъём или опускание) в узких трубках, кана-

лах произвольной формы, пористых телах. Оно играет ключевую роль в таких областях, как биология, медицина, химия и нанотехнологии [1].

Капиллярный эффект также используется в неразрушающем контроле (капиллярный контроль или контроль проникающими веществами) для выявления дефектов, имеющих выход на поверхность контролируемого изделия [2]. Капиллярный метод и его цветная и люминесцентная разновидности выгодно отличаются от других методов. Они обладают хорошей чувствительностью и могут надёжно в производственных условиях выявить поверхностные дефекты с шириной раскрытия 1–5 мкм. Сфера применения капиллярного контроля и его разновидностей постоянно увеличивается, ведь для некоторых материалов и изделий капиллярный метод является единственным способом определения пригодности деталей к работе [2].

Капиллярное движение жидкости определяется сложным взаимодействием разных сил и факторов. В основе поведения жидкости в капиллярах лежат такие физические процессы, как поверхностное натяжение и смачивание [3]. Смачивание характеризуется силами поверхностного натяжения на границе жидкости не только с воздухом, но и с границей раздела твёрдая поверхность – газ. Для определения смачиваемости различных поверхностей обычно рассчитывают краевой угол θ по методу лежащей капли. В нём измеряется угол между твёрдой поверхностью и жидкостью в точке контакта трёх фаз, что можно увидеть на рисунке 1. Поэтому обозначаются величины поверхностных натяжений $\sigma_{жг}$, $\sigma_{жт}$, $\sigma_{тг}$.

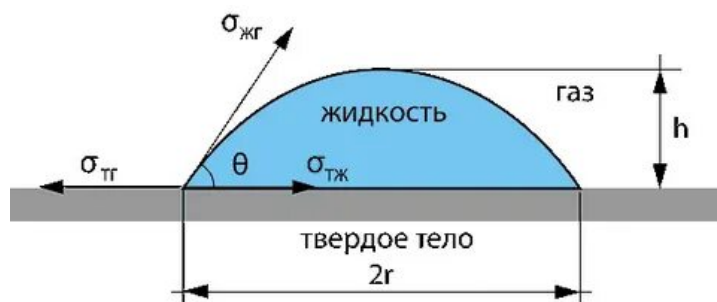


Рис. 1. Схема определение краевых углов [4]

Соотношение сил межфазного и поверхностного натяжения в точке контакта трёх фаз описывается уравнением Юнга, на базе которого можно определить краевой угол:

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{тг} - \sigma_{жт}}{\sigma_{жг}}. \quad (1)$$

Смачивание наглядно проявляется при погружении капилляров в сосуд с жидкостью. Если жидкость не смачивает капилляр, то её уровень жидкости будет ниже, чем в сосуде. Жидкость, которая смачивает капилляр, будет выше уровня жидкости в сосуде. Это явление можно увидеть на рисунке 2.

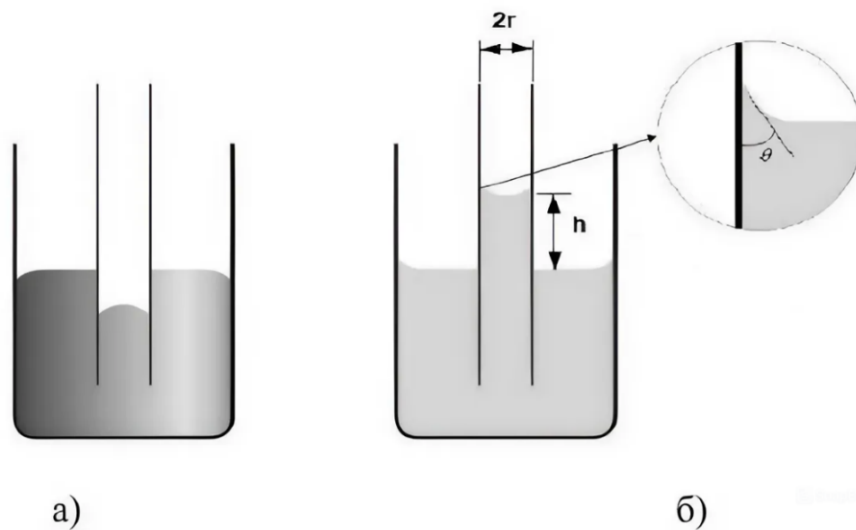


Рис. 2. Поведение жидкости при соприкосновении с а) – несмачивающей и б) – смачивающей поверхностями [3]

Рассмотрим подробнее поведение жидкости в тонком капилляре, опущенном в жидкость.

Поверхность жидкости в капилляре называется мениском, который представляет собой растянутую плёнку, стремящуюся сократиться. Жидкость стремится сформировать мениск с равновесным краевым углом. В области мениска создаётся пониженное давление за счет искривления межфазной поверхности, радиус кривизны этой поверхности определяется радиусом капилляра r и при заданном краевым углом θ . В соответствии с формулой Лапласа можно считать, что на мениске существует перепад давления [5]:

$$\Delta p = \frac{2\sigma \cos \theta}{r}. \quad (2)$$

Капиллярные явления обусловлены двумя разнонаправленными силами: сила тяжести $P_{тяж}$ заставляет жидкость опускаться вниз; сила поверхностного натяжения F двигает воду вверх. Момент остановки подъёма воды в узкой трубке наступает, когда сила тяжести $P_{тяж}$ субстанции уравнивает силу поверхностного натяжения F . Этот момент определяет высоту подъёма жидкости.

Сила поверхностного натяжения – это сила, действующая вдоль поверхности жидкости и стремящаяся сократить её площадь. Например, на поверхности раздела жидкость – воздух молекулы жидкости, находящиеся в поверхностном слое, сильнее притягиваются со стороны соседних молекул внутренних слоёв жидкости, чем со стороны молекул воздуха.

Способы определения поверхностного натяжения делятся на статические и динамические. Для изучения капиллярного эффекта применяют метод поднятия в капилляре, который относится к статическим методам. В статических методах поверхностное натяжение определяется у сформировавшейся поверхности, находящейся в равновесии. В его основе лежит уравнение Жюрена:

$$\sigma = \frac{h_m \Delta p g r}{2 \cos \theta}, \quad (3)$$

где h_m – предельная высота поднятия жидкости в капилляре;

θ – краевой угол между поверхностью и жидкостью;

Δp – разность плотностей жидкости и пара;

r – радиус капилляра;

g – ускорение свободного падения [5].

Из данного уравнения можно вывести высоту поднятия жидкости:

$$h_m = \frac{2 \cos \theta}{\Delta \rho g r}. \quad (4)$$

Исходя из формул можно, меняя параметры эксперимента, определить высоту поднятия жидкости. Для примера рассмотрим график зависимости поднятия воды от радиуса капилляра, что представлено на рисунке 3.

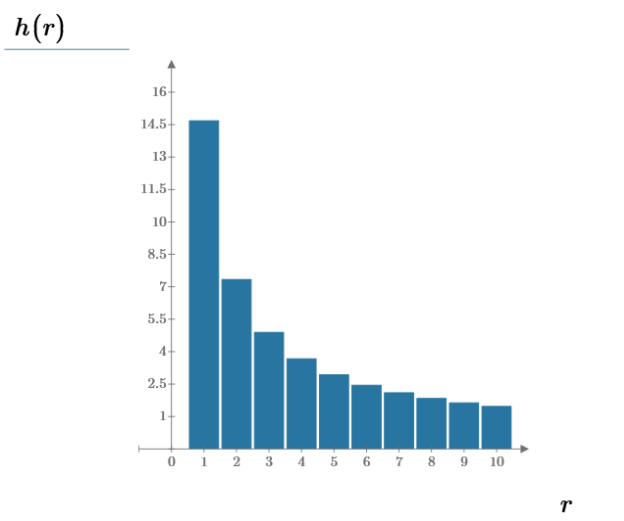


Рис. 3. График зависимости h от r

Для определения полей скорости и давления решаются уравнения Навье — Стокса, описывающие динамику массы и импульса сред с постоянной плотностью с учетом капиллярных сил и сил поверхностного натяжения [6]:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot pI + \eta((\nabla u) + (\nabla u)^T) + F_{st} + \rho g; \quad (5)$$

где ρ — плотность, кг/м³;

η — динамическая вязкость, Па·с;

u — скорость, м/с;

p — давление, Па;

g — ускорение свободного падения, м/с²;

F_{st} — поверхностное натяжение, возникающее на поверхности раздела, вода — воздух.

Анализ и визуализация этих процессов представляют собой сложную задачу, требующую применения многоуровневых подходов. Понимание динамики жидкостей в капиллярах может способствовать разработке новых методов диагностики, а также улучшению существующих технологий.

Однако экспериментальное изучение капиллярных процессов часто сопряжено с рядом трудностей. Во-первых, масштабы капиллярных явлений, происходящих на микро- и нано-уровнях, затрудняют прямое наблюдение и измерение параметров течения [7]. Во-вторых, сложность математического описания капиллярных течений, особенно в различных геометрических конфигурациях, ограничивает возможности аналитического анализа и прогнозирования [8]. Численное моделирование, хотя и является мощным инструментом, требует значительных вычислительных ресурсов и может быть сложным в реализации. Следовательно экспериментальное изучение капиллярного движения, особенно в сложных геометриях или

при экстремальных условиях, часто сопряжено с техническими трудностями и ограничениями, связанными с визуализацией, контролем параметров и высокой стоимостью оборудования. Поэтому для замены традиционных методов изучения движения жидкости в капиллярах целесообразна разработка симулятора в среде виртуальной реальности (VR).

Были рассмотрены теоретические основы капиллярного эффекта. Теперь перейдем к обсуждению возможностей его моделирования с использованием цифровых технологий. Основной задачей симуляции движения жидкости в капилляре является определение высоты поднятия жидкости в капилляре и время этого поднятия. В современных исследованиях, связанных с симуляцией движения жидкостей в капиллярах, активно применяются цифровые компьютерные технологии и виртуальная реальность [3]. Эти технологии играют важную роль в разработке точных моделей и их визуализации, обеспечивая возможность глубокого анализа движения жидкости на микроскопическом уровне.

Цифровые компьютерные технологии являются основой большинства симуляционных процессов. К ним относятся программные пакеты для научных расчетов, такие как MATLAB, ANSYS, COMSOL Multiphysics и другие. Эти платформы позволяют моделировать сложные физические процессы, такие как массопередача, теплообмен и динамика жидкостей, учитывая при этом различные параметры, такие как вязкость, плотность и давление. Использование численных методов, таких как метод конечных элементов и метод конечных разностей, позволяет производить точные расчеты и прогнозировать поведение жидкости в капилляре [8].

Как дополнение, для визуализации результатов широко используются программы для трехмерного моделирования, такие как Blender и Autodesk Maya. Они обеспечивают создание реалистичных моделей капилляров и жидкости, что позволяет учёным и исследователям лучше воспринимать сложные процессы, происходящие в капиллярах. Программное обеспечение позволяет создавать анимации и интерактивные визуализации, что значительно открывает новые перспективы для анализа и интерпретации данных [6].

Виртуальные технологии представляют собой другой уровень взаимодействия с численными моделями. VR предоставляет пользователям иммерсивную и интерактивную среду, позволяющую масштабировать процессы и взаимодействовать с ними в режиме реального времени [9]. Виртуальная реальность даёт возможность погрузиться в изучаемую рабочую среду, обеспечивая пользователям уникальный опыт взаимодействия с исследуемой моделью. Эта технология использует специальные устройства, такие как шлемы виртуальной реальности, контроллеры и трекеры движения, что позволяет пользователям не только наблюдать за моделью, но и взаимодействовать с ней. Обобщенная последовательность взаимодействия пользователя с виртуальной средой представлена на рисунке 4.

Программное обеспечение для виртуальной реальности, такое как Unity [10] и Unreal Engine [11], позволяет разработать интерактивные приложения для симуляции движения жидкости. Для разработки симуляции использована программная среда (движок) Unity, поскольку она обладает широкими возможностями для визуализации, поддерживает разработку для платформы Android и имеет развитую поддержку со стороны профессионального сообщества.

Виртуальная реальность не только визуализирует результаты, но и управляет параметрами симуляции в реальном времени. Для этого создаётся 3D-модели капилляра с возможностью изменения его геометрии, реализуется 3D-визуализация движения жидкости в капилляре и разрабатывается интерфейс взаимодействия с пользователем, который представлен в виде дополнительного меню с параметрами жидкости. Пример симуляции жидкости в капилляре в VR-среде представлен на рисунке 5.



Рис. 4. Последовательность действий пользователя при обучении в виртуальной среде [12]

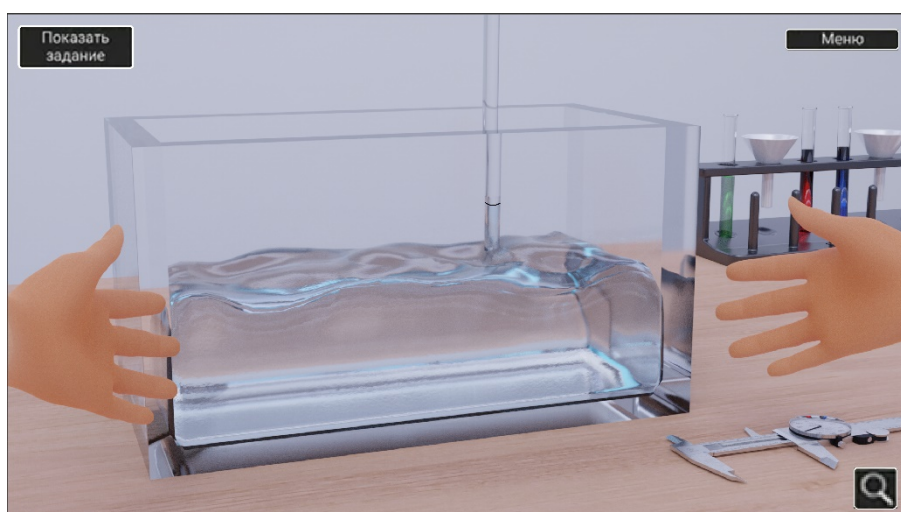


Рис. 5. Симуляция движения жидкости в капилляре с использованием технологии виртуальной реальности

В результате проведенного исследования можно сделать вывод, что разработка VR-приложения в среде движка Unity представляет собой перспективное направление для визуализации сложных физических явлений, таких как капиллярный эффект. Теоретические подходы и описанные физические модели подтверждают важность взаимодействия между молекулами жидкости и стенками капилляра, а также влияние факторов, таких как поверхностное натяжение и смачиваемость, на движение жидкости.

Использование технологий виртуальной реальности предоставляет возможность визуализировать процессы, которые трудно наблюдать в традиционных лабораторных условиях, и может стать мощным инструментом для обучения и демонстрации сложных физических явлений [13]. В дальнейшем целесообразно разработать полноценную симуляцию для подтверждения гипотез и анализа динамики жидкостей в капиллярах, что не только углубит знания в данной области, но и откроет новые горизонты для применения виртуальной реальности в науке и образовании.

Библиографический список

1. Велижанин А. А. Экспериментальное исследование двухфазного течения жидкостей в цилиндрическом капилляре / А. А. Велижанин, О. А. Симонов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2017. Том 3. № 4. С. 82-98.
2. Прохоренко, П. П. Введение в теорию капиллярного контроля / П. П. Прохоренко, Н. П. Мигун; под ред. А. С. Боровикова; АН БССР// Институт прикладной физики. — Минск: Наука и техника, 1988. — 206 с.
3. Ishbulatov, Lenar & Galyshev, Sergey & Solovev, Pavel & Aksenov, Andrey. Simulation of the capillary action via FlowVision software. - MATEC Web of Conferences. 2018, - pp. 224.
4. Кужаков П. В. Измерение степени гидрофильности поверхностей оптических материалов/ Кужаков П. В. // Журнал ТЗ №1 2017.— 2 с.
5. Грибанова Е. В., Кучек А. Э. Теория капиллярности и методы исследования поверхностных явлений. Учебное пособие. / Грибанова Е. В., Кучек А. Э. // СПб.: Изд-во ВВМ, 2015. — 159 с.
6. Ч.-Т. Ли. Численное моделирование капиллярного течения жидкости в микроканале с использованием метода конечных элементов / Ч.-Т. Ли // Прикладная механика и техническая физика. — 2016.— №5.— С. 198-210.
7. Gadegaard, N., Larsen, N. B., & Foss, M. Direct observation of capillary filling in microchannels. - Microelectronic Engineering, 2019. - pp. 165-172.
8. Mori, M., Ohashi, H., & Hibiki, T. Numerical simulation of capillary flow in a microchannel. - International Journal of Heat and Fluid Flow, 2012, - pp. 603-612.
9. Lee, E. A. Why virtual reality matters. Computer, 2015, - pp.20-29.
10. О разработке VR на Unity: [Электронный ресурс] // главная // блог // Разработка vr на unity. URL: <https://rating-gamedev.ru/blog/razrabotka-vr-na-unity>. (Дата обращения: 20.02.2025).
11. О разработке VR на Unreal Engine: [Электронный ресурс] // главная // блог // Почему unreal engine имеет преимущества при разработке виртуальной реальности. URL: <https://rating-gamedev.ru/blog/pocemu-unreal-engine-imeet-preimushhestva-pri-razrabotke-virtualnoi-realnosti>. (Дата обращения: 20.02.2025).
12. Пат. 2767087 РФ, МПК G09B 9/00. Способ обучения неразрушающему контролю / Е. Е. Ковшов, Д. Ф. Казаков, В. С. Кувшинников; заявитель и патентообладатель АО «НИКИМТ–Атомстрой». № 2021110407; заявл. 14.04.2021; опубл. 16.03.2022, Бюл. № 8.
13. Kovshov E. E., Kuvshinnikov V. S. (2022). Practical aspects of using VR- technologies for training specialists in non-destructive testing in industry. 2nd International Conference 2022 on Technological Enhanced Learning in Higher Education (TELE), pp. 254 – 257.

УДК 004.85; ГРНТИ 76.13

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ЗДРАВООХРАНЕНИИ: РОЛЬ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ОЦЕНКЕ БЕЗОПАСНОСТИ ЛЕКАРСТВ И ПРЕДОТВРАЩЕНИИ НЕЖЕЛАТЕЛЬНЫХ РЕАКЦИЙ

О.Д. Верещагина, Е.Ю. Тютюнджи

*МИРЭА - Российский технологический университет,
Российская Федерация, Москва, oliver1601@mail.ru, tyutyundzhi03@mail.ru*

Аннотация. Современное здравоохранение сталкивается с множеством проблем, напрямую связанных с увеличением объема данных, сложностью процессов разработки лекарств и необходимостью минимизации рисков для пациентов. Искусственный интеллект (ИИ) и машинное обучение (МО) становятся ключевыми инструментами для решения этих задач. В данной статье рассматривается роль МО в оценке безопасности лекарственных средств, прогнозировании нежелательных реакций и оптимизации фармаконадзора. Анализируются современные подходы, преимущества и ограничения технологий ИИ, а также их потенциал для трансформации здравоохранения. Особое внимание уделено практическим примерам использования МО в фармакологии и регуляторным аспектам внедрения ИИ в медицину.

Ключевые слова: искусственный интеллект, машинное обучение, фармаконадзор, нежелательные реакции на лекарства, персонализированная медицина, обработка естественного языка, глубокое обучение.

ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN HEALTHCARE: THE ROLE OF MACHINE LEARNING IN DRUG SAFETY ASSESSMENT AND PREVENTION OF ADVERSE REACTIONS

O.D. Vereshchagina, E.Yu. Tyutyundzhi

MIREA - Russian Technological University,

Russia, Moscow, oliver1601@mail.ru, tyutyundzhi03@mail.ru

The summary. Modern healthcare faces many challenges directly related to the increase in data volume, the complexity of drug development processes and the need to minimize risks to patients. Artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) are becoming key tools to address these challenges. This article examines the role of MO in assessing drug safety, predicting adverse reactions, and optimizing pharmacovigilance. Modern approaches, advantages and limitations of AI technologies, as well as their potential for transforming healthcare are analyzed. Particular attention is paid to practical examples of the use of ML in pharmacology and regulatory aspects of the implementation of AI in medicine.

Keywords: artificial intelligence, machine learning, pharmacovigilance, adverse drug reactions, personalized medicine, natural language processing, deep learning.

Безопасность лекарственных средств является одной из важнейших задач фармакологии и здравоохранения. Нежелательные реакции на лекарства (НРЛ) остаются серьезной проблемой, приводящей к ухудшению здоровья пациентов, увеличению затрат на медицинское обслуживание и даже к летальным исходам. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), НРЛ входят в список ведущих причин смертности в странах, из-за чего 17 сентября каждого года, под эгидой ВОЗ, было принято решение отмечать всемирный день безопасности пациентов [1]. Традиционные методы оценки безопасности лекарств, такие как клинические испытания и постмаркетинговый надзор, часто ограничены объемом данных, временными ресурсами и неспособностью выявлять редкие или отсроченные реакции.

В этом контексте искусственный интеллект и машинное обучение предлагают новые возможности для анализа больших объемов данных, выявления скрытых закономерностей и прогнозирования рисков. Эти технологии способны трансформировать фармаконадзор, сделав его более эффективным, точным и персонализированным. В данной статье рассматриваются основные методы МО, их применение в оценке безопасности лекарств, а также преимущества и недостатки, связанные с их внедрением.

Методы МО в оценке безопасности лекарств

Анализ клинических данных

В данной области алгоритмы МО используются для обработки больших объемов данных клинических испытаний, электронных медицинских карт (ЭМК) и регистров пациентов. Это позволяет выявлять потенциальные риски, которые могут быть упущены при проведении ручного анализа. Например, методы кластеризации и классификации помогают группировать пациентов по схожим характеристикам и прогнозировать их реакцию на лекарства.

Типы клинических данных

Структурированные данные: это данные, которые имеют четкую структуру, например, результаты лабораторных исследований, демографическая информация о пациентах и данные о лечении. Они обычно хранятся в электронных медицинских записях (ЭМЗ).

Неструктурированные данные: такие данные включают текстовые записи врачей, заметки о пациентах, изображения медицинских обследований, например, рентгеновские снимки.

Применение машинного обучения для анализа клинических данных

Классификация: алгоритмы МО могут классифицировать пациентов по различным категориям, например, по степени риска развития заболеваний. Это может помочь в принятии решений о назначении лечения.

Регрессия: методы регрессии позволяют предсказывать количественные исходы, такие как продолжительность жизни пациента или вероятность возникновения побочных эффектов на основе исторических данных.

Кластеризация: алгоритмы кластеризации могут использоваться для группировки пациентов с похожими характеристиками или реакциями на лечение, что может помочь в индивидуализации терапии.

Анализ временных рядов: МО может применяться для анализа временных данных, таких как изменения показателей здоровья пациента во времени, что позволяет выявлять тренды и предсказывать будущие состояния.

Методы машинного обучения

Деревья решений: простые и интерпретируемые модели, которые позволяют визуализировать процесс принятия решений на основе различных факторов. Пример такого дерева изображен на рисунке 1.

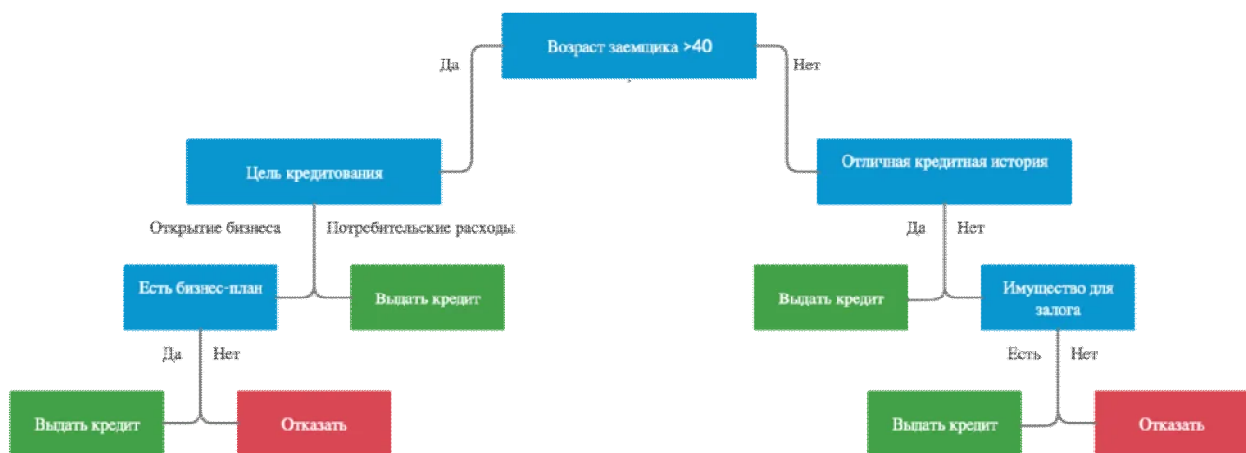


Рис.1. Дерево решений [1]

Случайные леса: ансамблевый метод, который использует множество деревьев решений для повышения точности предсказаний и уменьшения переобучения.

Нейронные сети: особенно эффективны для обработки неструктурированных данных, таких как текстовые записи и изображения. Глубокие нейронные сети могут выявлять сложные паттерны в данных.

Методы опорных векторов (SVM): используются для классификации и регрессии, хорошо работают с высокоразмерными данными.

Представим, что у нас есть данные о пациентах, которые относятся к двум различным категориям, например, здоровые пациенты и пациенты с определённым заболеванием. Эти данные можно представить в виде набора точек на графике. Задача алгоритма SVM заключается в том, чтобы найти такую линию в двухмерном пространстве или плоскость/гиперплоскость в многомерном пространстве, которая наиболее чётко разделяет эти категории пациентов.

Например, у нас есть медицинские показатели, такие как уровень холестерина, артериальное давление и индекс массы тела. Алгоритм SVM проанализирует эти данные и по-

строит границу, которая будет максимально эффективно отделять здоровых людей от тех, кто имеет заболевание. В результате все здоровые пациенты будут находиться с одной стороны границы, а больные — с другой. Для наглядности на рисунке 2 представлен пример классификации точек с использованием SVM.

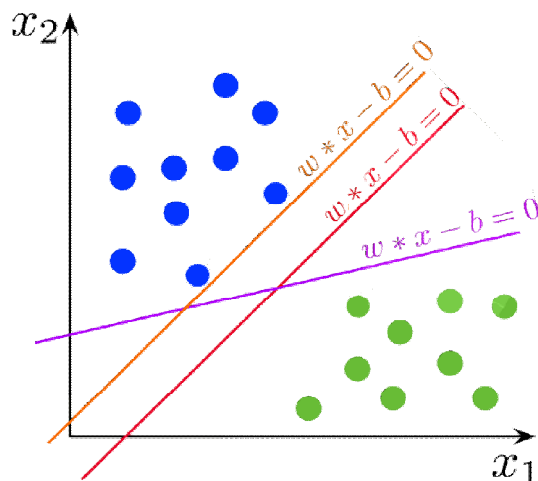


Рис. 2. Классификация точек с помощью SVM [12]

Прогнозирование нежелательных реакций

Модели МО, такие как нейронные сети, методы ансамблирования, такие как случайные леса или градиентный бустинг и методы глубокого обучения, способны прогнозировать НРЛ на основе химической структуры лекарств, биологических маркеров и данных о пациентах. Например, алгоритмы могут анализировать структуру молекулы лекарства и предсказывать его взаимодействие с биологическими мишенями или оказывать помощь в анализе влияния конкретного препарата на организм пациента. Для лучшего понятия процесса и сути анализа приведем пример с расчетами.

Допустим, нам необходимо измерить уровень гемоглобина до и после приема некоторого препарата у группы пациентов согласно некоторому протоколу лечения. Мы хотим знать, изменится ли уровень гемоглобина после приема препарата и если изменится, то как [8]. Входные данные представлены в таблице на рисунке 3.

Номер пациента	Уровень до приема, г/л	Уровень после приема, г/л	Разность, г/л
1	100	130	30
2	95	110	15
3	73	120	47
4	98	115	17
5	110	105	-5
6	101	125	24

Рис. 3. Таблица входных данных [9]

Выдвигается гипотеза: истинное среднее разности средних μ равно нулю $H_0: \mu = 0$, альтернативная $H_a: \mu \neq 0$, $\alpha = 0,05$. Убедившись, что разность распределена нормально, выбросы отсутствуют, рассчитываем t-статистику $t = (\bar{x} - C)/(s/\sqrt{n})$. $C = 0$, $\bar{x} = 21,33$, $s = 17,28$.

$t = 21,33/(17,28/\sqrt{6})=3,02$. Критическое значение для двустороннего теста (поскольку мы проверяем гипотезу о том, что разность отлична от нуля) $t_{0,975;5} = 2,57$. Гипотеза о нулевой разности в средних отклоняется. На уровне значимости $\alpha = 0,05$, что средний уровень гемоглобина изменился после приема препарата.

Теперь нам надо уточнить количественный минимальный эффект, т.е. на сколько увеличился уровень гемоглобина в среднем. Допустим нас интересует минимальный эффект в 10 г/л. Выдвигаем нулевую гипотезу: $H_0: \mu \leq 10$ против $H_a: \mu > 10$, $\alpha = 0,05$; рассчитываем статистику $t = (21,33 - 10)/(17,28/\sqrt{6}) = 1,61$. Критическое значение для одностороннего теста $t_{0,95;5} = 2,02$. Нулевая гипотеза не отклоняется.

Проведем анализ данных примера с помощью доверительных интервалов. Построим доверительные интервалы для полученной оценки разности. Двусторонний интервал:

$$X_L = \bar{x} - t_{\gamma;(n-1)} * s/\sqrt{n} = 21,33 - 2,57 * 17,28/2,45 = 3,20;$$

$$X_u = \bar{x} + t_{\gamma;(n-1)} * s/\sqrt{n} = 21,33 + 2,57 * 17,28/2,45 = 39,46.$$

Действительно, и нижняя и верхняя границы лежат правее нуля, а значит, что гипотеза о том, что $H_0: \mu = 0$, отклоняется.

Построим нижнюю границу одностороннего интервала:

$$X_L = \bar{x} - t_{\gamma;(n-1)} * s/\sqrt{n} = 21,33 - 2,02 * 17,28/2,45 = 7,08.$$

Здесь же нижняя граница лежит левее интересующего нас эффекта, что означает, что доверительный интервал включает в себя значение интересующего нас эффекта [9].

Говоря про МО, нельзя исключать из внимания факт её помощи в поиске /подборе лекарственных препаратов. Такой процесс часто основывается на знаниях о биологической мишени, включающей в себя целевой белок, с которым должно взаимодействовать лекарственное вещество. Для упрощения поиска и минимизации ошибок часто прибегают к помощи МО, как предсказанию молекулярных свойств потенциальной молекулы лекарства, формы какого-либо белка, активности взаимодействия между веществами. Одна из главных задач МО — сужение круга поиска лекарств. Для предсказания свойств молекул обычно используют молекулярный граф (см. рис 4) — графическое представление молекулы, а именно ее атомов и связей [4].

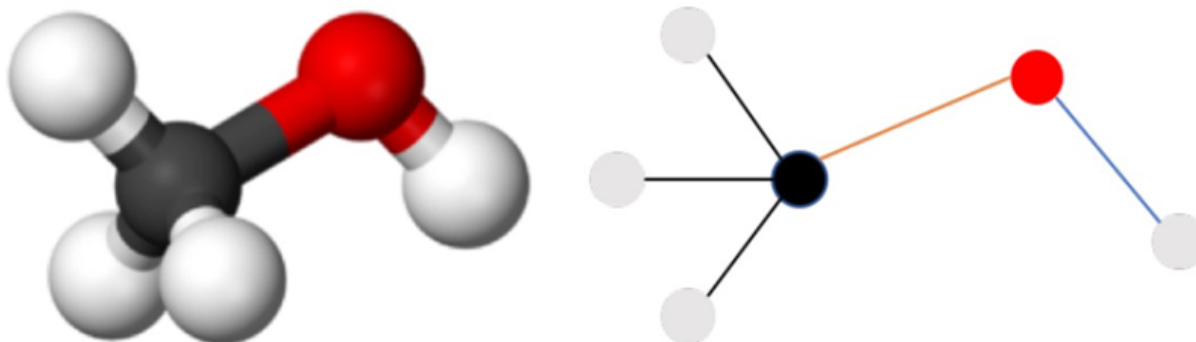


Рис. 4. Пример молекулярного графа [4]

Интеграция разнородных данных. МО позволяет объединять данные из различных источников, включая геномные, транскриптомные, метаболомные данные и данные из социальных сетей. Это особенно важно для персонализированной медицины, где необходимо учитывать индивидуальные особенности пациента.

Автоматизация фармаконадзора. Системы на основе ИИ автоматически анализируют отчеты о НРЛ, что ускоряет процесс выявления потенциальных угроз. Например, алгоритмы обработки естественного языка (NLP) могут извлекать информацию из текстовых отчетов и классифицировать их по степени серьезности.

Анализ естественного языка

Анализ естественного языка можно разделить на два основных подхода: простые количественные методы, основанные на принципе «мешка слов», и более сложные методы, позволяющие глубже понять текст.

Принцип «мешка слов». Это довольно простой способ анализа текста, который рассматривает его как набор отдельных слов, не принимая во внимание их порядок и взаимосвязи. Такой метод удобен для простого поиска информации, однако он имеет свои недостатки, особенно в контексте медицины. Различные формы одного и того же термина могут рассматриваться как разные слова, что приводит к ошибкам.

Продвинутые методы. Эти методы позволяют проводить глубокий анализ текста, выявлять смыслы слов, их взаимосвязи, эмоциональную окраску, отношение автора и другие нюансы. Они помогают извлекать из текстов важные данные, такие как ключевые понятия, объекты, категории, а также тонкости, скрытые за словами.

Для эффективного использования этих методов необходимо предварительно обработать текст: устранить ошибки, привести слова к единому виду, нормализовать единицы измерения, даты и время. Для этого применяются следующие инструменты.

Токенизатор. Один из основных компонентов конвейера NLP. Они служат одной цели: преобразовать текст в данные, которые могут быть обработаны моделью. Модели могут обрабатывать только числа, поэтому токенизаторы должны преобразовывать наш текст в числовые данные [7].

Парсер. Это программа для сбора и систематизации информации, размещенной на различных сайтах. Источником данных может служить текстовое наполнение, HTML-код сайта, заголовки, пункты меню, базы данных и другие элементы [8].

Современные исследования показывают, что даже сложные нейронные сети могут успешно работать с текстами, не основываясь на знании всех правил языка. Например, в книге «Понимание текста с нуля» продемонстрировано, как можно использовать сверточные нейронные сети (CNN) для анализа текста без глубокого знания его структуры. Также существуют примеры применения рекуррентных нейронных сетей (RNN) для определения частей речи в предложениях [3].

Применение МО в фармаконадзоре

Обнаружение побочных эффектов. Алгоритмы МО, такие как логистическая регрессия и градиентный бустинг, используются для анализа данных о побочных эффектах и выявления редких или отсроченных реакций. Например, в 2018 году исследователи из Стэнфордского университета разработали систему Decagon, которая предсказывала побочные эффекты лекарств на основе их химической структуры и данных клинических испытаний. Используя методы глубокого машинного обучения, они изучили около 4 миллионов известных примеров взаимодействия препаратов, после чего специалисты разработали способ определения закономерностей появления побочных эффектов, основываясь на том, каким образом медикаменты воздействуют на белки.

Персонализированная медицина

МО помогает прогнозировать индивидуальные реакции пациентов на лекарства, учитывая их генетические особенности, историю болезни и другие факторы. Например, алгоритмы могут предсказывать, как пациент с определенным генетическим профилем отреагирует на конкретное лекарство.

К тому же, персонализированная медицина использует данные о пациентах для разработки индивидуализированных подходов к лечению и профилактике заболеваний. Машинное обучение играет ключевую роль в этом процессе.

1. Геномное секвенирование или, проще говоря, метод получения информации о молекулярной структуре ДНК: МО используется здесь для анализа геномных данных, чтобы выявить генетические мутации, связанные с определенными заболеваниями. Это помогает в выборе наиболее подходящих методов лечения, например, для онкологических пациентов.

2. Прогнозирование ответа на лечение: МО-модели могут предсказывать, как конкретные пациенты будут реагировать на определенные препараты, основываясь на их генетической информации и других клинических данных. Это особенно актуально в онкологии, где разные виды рака могут по-разному реагировать на химиотерапию.

3. Анализ медицинских изображений: алгоритмы глубокого обучения используются для анализа рентгеновских снимков, МРТ и КТ-сканов, что позволяет выявлять патологии на ранних стадиях и предлагать индивидуализированные планы лечения.

4. Электронные медицинские записи (ЭМЗ): машинное обучение может анализировать большие объемы данных из ЭМЗ, чтобы выявить закономерности и предсказать развитие заболеваний у конкретных пациентов.

5. Персонализированные рекомендации по образу жизни: МО может использоваться для создания рекомендаций по диете, физическим упражнениям и другим аспектам образа жизни на основе индивидуальных характеристик пациента, таких как возраст, пол, генетика и наличие хронических заболеваний.

6. Мониторинг состояния здоровья: устройства носимой электроники собирают данные о состоянии здоровья пациентов в реальном времени. Машинное обучение анализирует эти данные для прогнозирования обострений заболеваний или выявления новых проблем со здоровьем.

7. Разработка новых лекарств: МО помогает в открытии и разработке новых лекарственных средств путем анализа больших объемов данных о взаимодействии молекул и их эффектах на различные заболевания.

Анализ социальных сетей и форумов. Социальные сети и медицинские форумы становятся важным источником данных о НРЛ. Алгоритмы NLP анализируют текстовые сообщения пользователей и выявляют упоминания о побочных эффектах. Это позволяет обнаруживать новые риски на ранних этапах.

Оптимизация клинических испытаний. МО помогает оптимизировать дизайн клинических испытаний, выбирая наиболее подходящие группы пациентов и прогнозируя возможные риски. Это снижает затраты и ускоряет процесс разработки лекарств.

Преимущества использования МО в оценке безопасности лекарств

Ускорение анализа данных

МО позволяет обрабатывать большие объемы данных за короткое время, что значительно ускоряет процесс оценки безопасности.

Повышение точности прогнозирования

Алгоритмы МО способны выявлять сложные взаимосвязи, которые не могут быть обнаружены с помощью традиционных методов.

Персонализация лечения

МО учитывает индивидуальные особенности пациентов, что позволяет разрабатывать персонализированные схемы лечения.

Снижение затрат

Автоматизация процессов фармаконадзора снижает затраты на ручной анализ данных.

Проблемы и ограничения

Качество данных. Недостаток данных: для успешного применения машинного обучения необходимы большие объемы качественных данных о взаимодействии лекарств с белками организма. Такие данные могут быть труднодоступны или неполными, особенно для редких заболеваний или новых молекул.

Ошибки в данных: ошибочные или неточные данные могут привести к неправильным выводам и прогнозам, что снижает эффективность модели.

Интерпретируемость моделей. Черные ящики: многие современные алгоритмы машинного обучения работают как «черные ящики», то есть сложно понять, почему модель приняла определенное решение. Это затрудняет интерпретацию результатов и может вызывать недоверие со стороны специалистов.

Прозрачность решений: в медицине важно понимать механизмы воздействия лекарств на организм, поэтому непрозрачные модели могут быть неприемлемыми.

Технические сложности. Высокая вычислительная сложность: обучение сложных моделей требует значительных вычислительных ресурсов, что может ограничивать возможности небольших исследовательских групп.

Необходимость постоянного обновления: с развитием науки появляются новые знания о механизмах работы лекарств, и модели необходимо регулярно обновлять, чтобы учитывать последние достижения.

Заключение

В современном мире искусственный интеллект и машинное обучение все более проникают в нашу повседневную жизнь, затрагивая множество её аспектов, включая сферу здравоохранения. В этой области данные технологии представляют собой мощные инструменты, способствующие повышению безопасности медикаментов и совершенствованию медицинской практики. Они позволяют эффективно обрабатывать обширные массивы данных, выявлять скрытые закономерности и прогнозировать потенциальные риски, что, в свою очередь, способствует разработке более точных и персонализированных схем лечения.

Тем не менее, несмотря на множество преимуществ, внедрение ИИ и МО в здравоохранение сталкивается с рядом вызовов, таких как необходимость наличия высококачественных данных, значительная вычислительная сложность и вопросы интерпретируемости моделей.

Для дальнейшего развития и интеграции этих технологий потребуется тесное сотрудничество между специалистами в области медицины, информатики и инженерии. Это взаимодействие поможет преодолеть существующие ограничения и максимально раскрыть потенциал ИИ и МО в интересах пациентов и всей системы здравоохранения.

Библиографический список

1. Что такое дерево решений и где его используют? // Хабр URL: <https://habr.com/ru/companies/productstar/articles/523044/> (дата обращения: 02.02.2025).
2. Всемирный день безопасности пациентов // документ URL: ncagp.ru/upload/files/for_med_repsonal.pdf (дата обращения: 02.02.2025).
3. Использование машинного обучения и искусственных нейронных сетей в жизненном цикле лекарственных средств // Лаборатория перспективных технологий URL: <https://lpt.digital/blog/ispolzovanie-mashinnogo-obucheniya-i-iskusstvennykh-neyronnykh-setey-v-zhiznennom-tsikle-lekarstvenn/> (дата обращения: 02.02.2025).
4. Машинное обучение в медицине // Викиконспекты URL: peerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=Машинное_обучение_в_медицине (дата обращения: 02.02.2025).
5. ИИ и машинное обучение в медицине, ч.3. Проблемы использования "умных" технологий в медицине // Хабр URL: <https://habr.com/ru/companies/cloud4y/articles/507800/> (дата обращения: 02.02.2025).

6. Машинное обучение в медицине: тенденции и достижения // Новая наука URL: <https://new-science.ru/mashinnoe-obuchenie-v-medicine-tendencii-i-dostizheniya/> (дата обращения: 02.02.2025).
7. Токенизаторы // Hugging face URL: <https://huggingface.co/learn/nlp-course/ru/chapter2/4> (дата обращения: 02.02.2025).
8. Парсер // Skillfactory Media URL: <https://blog.skillfactory.ru/glossary/parser/> (дата обращения: 02.02.2025).
9. О.В. Красько СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ В МЕДИЦИНСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ / О.В. Красько — Часть I. — Минск: УО «Международный государственный экологический университет имени А.Д. Сахарова», 2014 — 126 с.
10. Персонализированная медицина // Википедия URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Персонализированная_медицина (дата обращения: 05.02.2025).
11. Искусственный интеллект в медицине: как машинное обучение помогает диагностике и лечению пациентов // IQ media URL: <https://iq-media.ru/trends/iskusstvennyy-intellekt-v-meditsine-kak-mashinnoe-obuchenie-pomogaet-diagnostike-i-lecheniyu-patsientov> (дата обращения: 05.02.2025).
12. Метод опорных векторов // Викиконспекты URL: [https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=Метод_опорных_векторов_\(SVM\)](https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=Метод_опорных_векторов_(SVM)) (дата обращения: 05.02.2025).
13. Как устроено машинное обучение: задачи, алгоритмы и виды machine learning // Skillbox Media URL: <https://skillbox.ru/media/code/kak-ustroeno-mashinnoe-obuchenie-zadachi-algoritmy-i-vidy-machine-learning/> (дата обращения: 05.02.2025).

УДК 004.75; ГРНТИ 20.15.05

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОДСИСТЕМЫ УВЕДОМЛЕНИЙ И ПОДСИСТЕМЫ ЗАДАЧ ДЛЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА РИСКПРОФ

Д.И. Булатицкий, Н.А. Грудина

*Брянский государственный технический университет,
Российская Федерация, Брянск, nikita.grudina@mail.ru*

Аннотация. В работе рассматриваются методы асинхронного взаимодействия информационных систем. Приводится описание принципов работы, а также рассматриваются различные шаблоны, используемые при их реализации. Рассмотрены два наиболее встречающихся метода взаимодействия: очередь сообщений и очередь задач. На основе проанализированных методов разработана архитектура подсистемы уведомлений и подсистемы задач для программного комплекса РискПроф. Описана реализация рассмотренных методов в проектируемых подсистемах.

Ключевые слова: информационная система, асинхронное взаимодействие, очередь задач, очередь сообщений.

DESIGN OF NOTIFICATION SUBSYSTEM AND TASK SUBSYSTEM FOR THE RISKPROF SOFTWARE PACKAGE

D.I. Bulatytsky, N.A. Grudina

*Bryansk State Technical University,
Russia, Bryansk, nikita.grudina@mail.ru*

The summary. The paper considers methods of asynchronous interaction of information systems. The principles of operation are described, and various patterns used in their implementation are considered. Two most common methods of interaction are considered: message queue and task queue. Based on the analyzed methods, the architecture of the notification subsystem and task subsystem for the RiskProf software package are developed. The implementation of the considered methods in the designed subsystems is described.

Keywords: information system, asynchronous interaction, task queue, message queue.

Программный комплекс РискПроф (<https://riskprof.ru/>) – это распределенная система с микросервисной архитектурой [4], которая предназначена для управления процессами охраны труда, в том числе оценкой профессиональных рисков (ОПР), обучением по охране труда и специальной оценкой условий труда (СОУТ). Данная система состоит из множества взаимодействующих подсистем, некоторые из которых описаны в [5, 6]. По мере функциониро-

вания комплекса, возникают различные события, о которых необходимо уведомить пользователей. Их можно разделить на две категории:

- 1) События, которые возникли при работе пользователя в системе, например, при выдаче администратором обучения доступа к определенному учебному курсу или при создании учётной записи обучаемого.
- 2) Периодические события, возникающее по истечении определенного времени, например, при окончании срока подписки.

Стоит отметить, что некоторые из возникающих событий, запускают асинхронные процессы, о результатах которых также необходимо уведомлять пользователей. Примером такого процесса является процесс генерации полного отчета о результатах оценки профессиональных рисков, размер которого может составлять несколько сотен страниц.

В связи с этим, было принято решение разработать следующие подсистемы:

- Подсистема задач, которая предназначена для распределенного выполнения асинхронных процессов в программном комплексе РискПроф.
- Подсистема уведомлений, которая предназначена для проактивного уведомления пользователей о событиях, происходящих в программном комплексе РискПроф.

Процессы формирования и доставки уведомлений являются асинхронными. На основе событий из различных подсистем формируются уведомления для отправки. Далее уведомления помещаются в хранилище, а после извлекаются из него и отправляются получателям.

При проектировании решения одной из основных задач являлась задача выбора метода асинхронного взаимодействия для обмена информацией между подсистемами. Были рассмотрены следующие решения.

Очередь сообщений

Одним из основных способов асинхронного обмена информацией является очередь сообщений, которая выступает посредником между отправителем и получателем [1]. Принцип её работы заключается в следующем:

- 1) Отправитель формирует на своей стороне сообщение, отправляет его в очередь и продолжает синхронное выполнение, не дожидаясь факта доставки сообщения.
- 2) Очередь получает сообщение и предоставляет получателям доступ к нему.
- 3) В зависимости от используемого шаблона взаимодействия, сообщение доставляется конечному получателю определенным способом.

Выделяют два основных шаблона (рисунок 1) взаимодействия получателя с очередью сообщений [2]:

- Суть шаблона «один-к-одному» заключается в том, что на каждое сообщение отправителя есть только один получатель, который периодически опрашивает очередь на наличие сообщения в его адрес, и, если такое присутствует, извлекает его.
- Шаблон «издатель-подписчик» подразумевает, что на каждое сообщение отправителя (издателя) может быть несколько получателей (подписчиков). Получатель подписывается на определенные типы сообщений и обрабатывает сообщения по мере их получения от очереди.

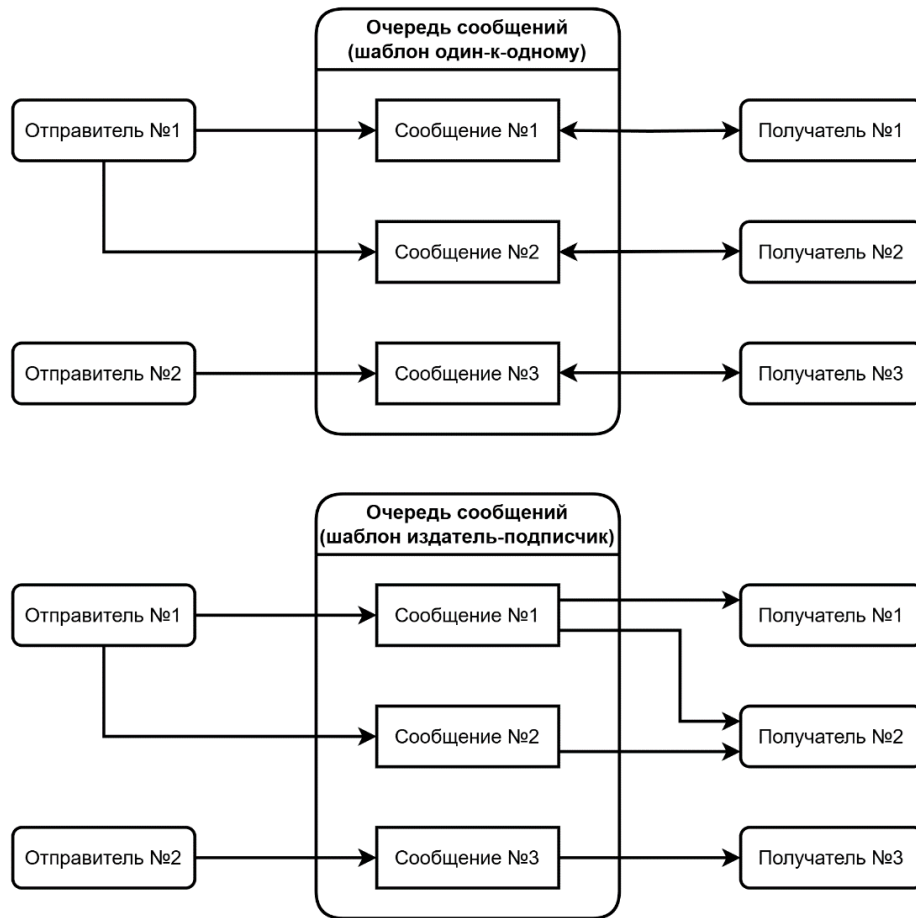


Рис. 4. Шаблоны взаимодействия очередей сообщений

Существует множество готовых реализаций очередей сообщений, основанных на данных шаблонах, среди которых самыми популярными являются RabbitMQ (шаблоны один-к-одному и издатель-подписчик), Apache Kafka (шаблон издатель-подписчик) и Microsoft Message Queuing (шаблон один-к-одному).

Очередь задач (заданий)

Еще одним способом асинхронного взаимодействия между системами является очередь задач. В отличие от очереди сообщений, основным назначением данного метода является распределенная обработка задач [3], без прерывания основного потока исполнения. Однако, в некоторых случаях, его также можно использовать для асинхронного обмена информацией. Принцип работы очереди задач (рисунок 2) заключается в следующем:

- 1) Инициатор создает задачу и отправляет ее диспетчеру задач.
- 2) Диспетчер задач получает задачу и сохраняет ее для дальнейшей обработки.
- 3) В зависимости от используемой архитектуры, в определенный момент времени диспетчер запускает выполнение сохраненных ранее задач, направляя их исполнителям.
- 4) Исполнитель получает, выполняет задачу и возвращает диспетчеру статус обработки.

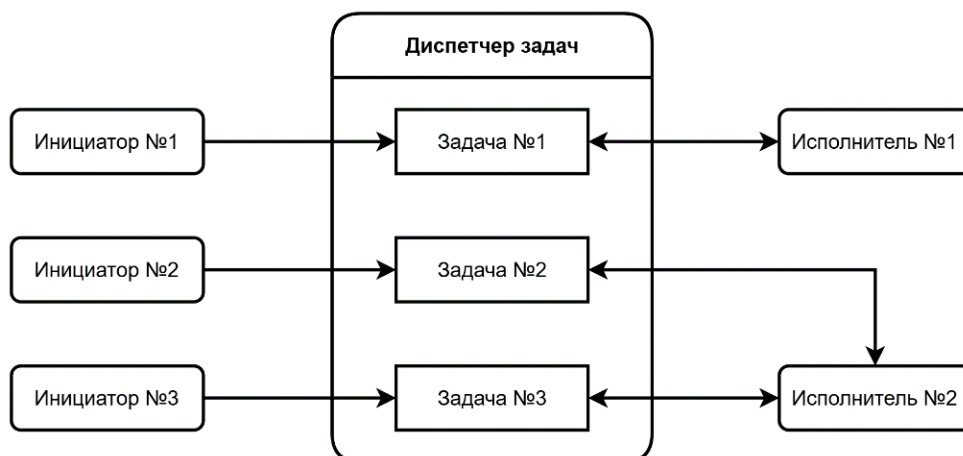


Рис. 5. Принцип работы очереди задач

Существуют различные архитектуры диспетчера задач, среди которых можно выделить [3]:

- Время-ориентированная архитектура, в которой диспетчер в определенный промежуток времени выбирает из своего хранилища задачи и направляет их исполнителям для обработки.
- Событийно-ориентированная архитектура, в которой диспетчер инициирует выполнение задач при наступлении определенного события, например, при завершении обработки прежней задачи или создании новой.

Стоит отметить, что довольно часто реализация данной очереди выполняется на уровне кода программы, когда инициатором и диспетчером является родительский процесс, а исполнителями – дочерние процессы, порожденные с целью выполнения определенных задач. Примером такой реализации является библиотека Celery для Python. Также в качестве диспетчера и исполнителей возможно использование внешних систем, например – очереди задач, основанные на СУБД Redis.

На основе проведенного анализа, была разработана архитектура подсистемы задач (рисунок 3).

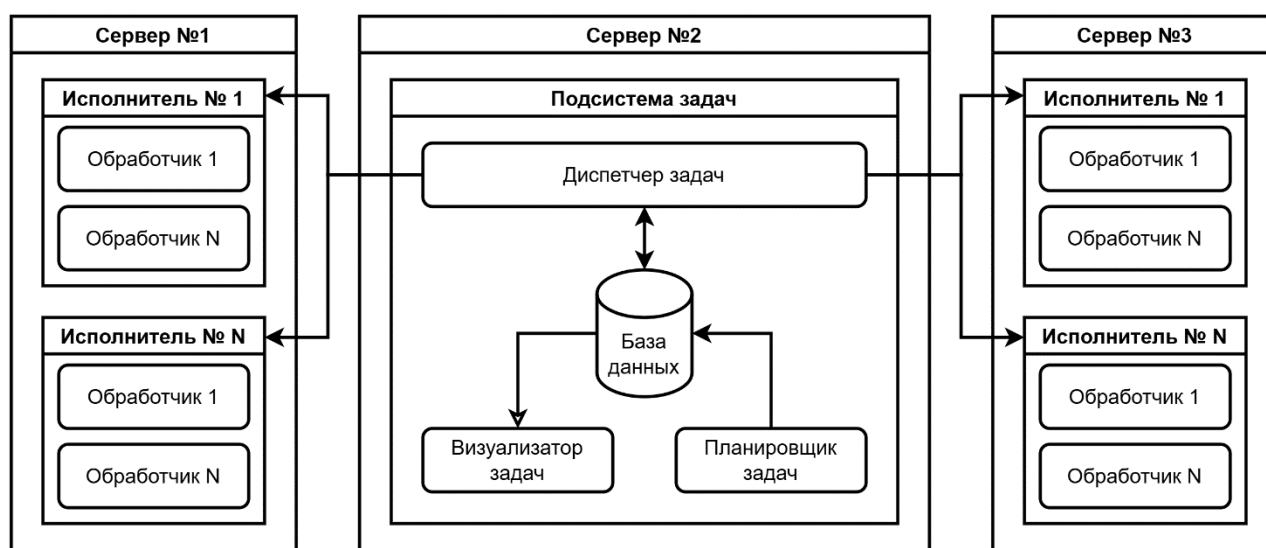


Рис. 6. Архитектура подсистемы задач

Подсистема задач – это распределенная система, которая является реализацией очереди задач с событийно-ориентированной архитектурой. Диспетчером выступает веб-приложение, осуществляющее прием задач от смежных подсистем, их хранение и распределение по исполнителям. Исполнители, в свою очередь, также являются веб приложениями, объединенными в вычислительные кластеры.

Как можно заметить, исполнители находятся обособленно от основной подсистемы задач. Они самостоятельно подключаются к диспетчеру, и информируют его о готовности получения и выполнении заданий. Благодаря такой распределенной архитектуре, можно значительно ускорить выполнение асинхронных процессов, разделив нагрузку по нескольким серверам. Помимо прочего, каждый исполнитель содержит в себе набор обработчиков, предназначенных для выполнения конкретных типов задач. Исполнителю известно, какие обработчики у него есть, и какие типы задач он может обрабатывать. Эту информацию он передает диспетчеру при подключении. При распределении задач диспетчер будет отправлять их только тем исполнителям, которые могут их выполнить. Также благодаря тому, что все исполнители подключаются к одному диспетчеру, появляется возможность их гибкой настройки на уровне конфигурации. Например, можно указать, что определенный исполнитель будет выполнять только определенный тип задач, хотя на самом деле он может выполнять и задачи другого типа.

Также стоит отметить, что данная реализация очереди задач оснащена дополнительными механизмами визуализации и планирования заданий. Визуализатор задач является веб-приложением, которое разделено на глобальную и личную части. Глобальный визуализатор предназначен для администраторов системы и позволяет просматривать полный список заданий. Личный визуализатор предназначен для просмотра пользователями задач, для которых они являются инициаторами. Благодаря визуализатору можно отслеживать статус выполнения задач, а с помощью планировщика можно, используя заранее подготовленные шаблоны, настроить автоматическое создание заданий определенных типов.

После была разработана архитектура подсистемы уведомлений (рисунок 4). Она использует подсистему задач для инициации процесса формирования уведомлений, путем встраивания в неё модуля формирования уведомлений.

Модуль формирования уведомлений является исполнителем, для которого предназначены несколько специальных типов задач, при выполнении которых происходит сбор дополнительной информации из смежных подсистем и создаются сообщения. Так как данный модуль встраивается в подсистему задач, то его также можно использовать для уведомления пользователей о результатах выполнения асинхронных процессов.

Сообщения, сформированные в подсистеме задач, направляются исполнителем напрямую в модуль хранения и обработки подсистемы уведомлений. Данный модуль является реализацией очереди сообщений на основе шаблона взаимодействия один-к-одному. В качестве хранилища сообщений выступает СУБД PostgreSQL. Модель данных очереди сообщений представлена на рисунке 5.

Отправителем в данном случае является исполнитель подсистемы задач, а получателями – различные обработчики в модуле отправки уведомлений, которые периодически опрашивают очередь на наличие уведомлений и, если такие присутствуют, извлекают их и отправляют получателям.

Уведомления, переданные конечным получателям, содержат ссылку для более детального ознакомления с информацией. Данная ссылка ведет на модуль визуализации уведомлений, основной целью которого является предоставление получателям возможности скачивания выписок и отчетов из смежных подсистем.

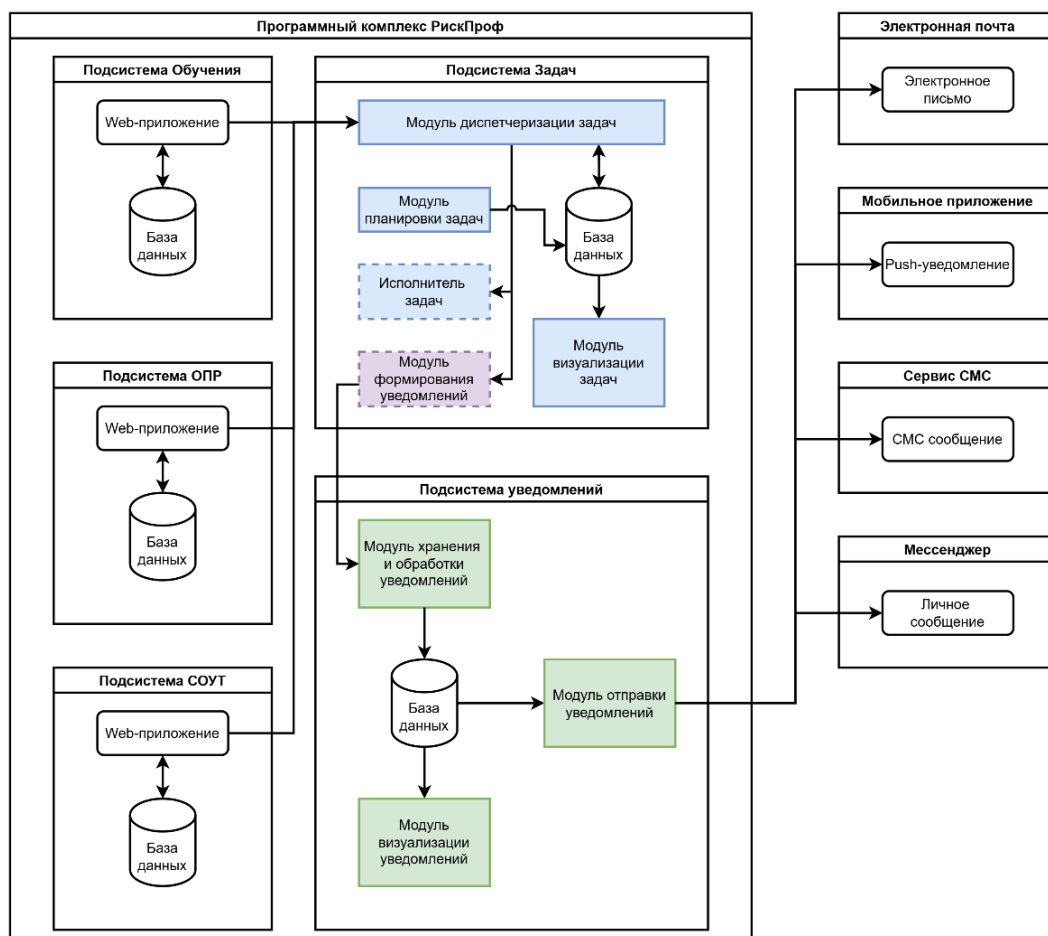


Рис. 7. Архитектура подсистемы уведомлений



Рис. 8. Модель данных очереди сообщений подсистемы уведомлений

В данной работе были проанализированы методы асинхронного взаимодействия информационных систем: очередь сообщений и очередь задач. Были рассмотрены различные подходы, применяемые при реализации данных методов, а также рассмотрены готовые программные решения, такие как RabbitMQ и библиотека Celery. По итогам проведенного анализа, было принято решение спроектировать собственные реализации очереди задач и очереди сообщений для решения задачи проактивного информирования пользователей программного комплекса РискПроф. Была разработана архитектура подсистемы задач и подсистемы уведомлений, а также описан процесс их взаимодействия для решения поставленной задачи.

Библиографический список

1. Скрыпников, А. В. Применение асинхронного обмена информацией в веб-приложениях / А. В. Скрыпников, В. В. Денисенко, А. О. Амирханян // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2021. – № 12-3(63). – С. 105-108. – DOI 10.24412/2500-1000-2021-12-3-105-108. – EDN NQDCZI.
2. Технология работы межпроцессного взаимодействия посредством рассылки сообщений / Л. В. Бутова, А. Ю. Боровлев, Е. В. Корчагина, М. И. Озеров // Актуальные проблемы деятельности подразделений УИС : Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции: в 2-х томах, Воронеж, 23 октября 2020 года.
3. Бёрнс Б. Распределенные системы. Паттерны проектирования. — СПб.: Питер, 2019. — 224 с.: ил. — (Серия «Бестселлеры O'Reilly»). ISBN 978-5-4461-0950-0.
4. Копелиович, Д. И. Микросервисная архитектура как разновидность сервис-ориентированной архитектуры / Д. И. Копелиович, М. А. Кургуз, В. В. Лебедев // Наукосфера. – 2022. – № 4-2. – С. 230-235. – EDN ITTHUS.
5. Копелиович, Д. И. Автоматизированная система по рекомендации проведения медосмотров для сотрудников организации на основании сведений о рабочем месте / Д. И. Копелиович, А. А. Назаров, М. А. Кургуз // Инициативы молодых - науке и производству : Сборник статей IV Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и студентов, Пенза, 30 ноября 2022 года / Под научной редакцией А.В. Носова. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2022. – С. 248-254. – EDN CMVAJW.
6. Назаров, А. А. Подсистема обновления классификатора опасностей для веб-сервиса оценки профессиональных рисков «РискПроф» / А. А. Назаров // Информационные технологии в современном мире - 2023 : сборник материалов и докладов XIX Всероссийской студенческой конференции, Екатеринбург, 18 мая 2023 года. – Екатеринбург: Автономная некоммерческая организация высшего образования "Гуманитарный университет", 2023. – С. 87-90. – EDN RAYIGH.

УДК 681.518.22; ГРНТИ 50.47.29

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ КОМПРИМИРОВАНИЯ ВОДОРОДА

Р.Н. Фадеев

*Владимирский государственный университет,
Россия, Владимир, fadeevroman.shua@gmail.com*

Аннотация. Отмечается, что результаты патентного поиска свидетельствуют об имеющемся интересе к проблеме сжатия водорода для его последующего использования и об активных поисках технических решений этой задачи. Автор анализирует технологический процесс компримирования водорода с использованием мембранного компрессора как объект автоматизации. В статье рассмотрены инструменты редактора визуализации среды разработки приложений для программируемых контроллеров CODESYS V3.5, с помощью которых была осуществлена возможность для оператора дистанционно контролировать технологический процесс.

Ключевые слова: автоматизированное управление технологическим процессом, компримирование водорода, мембранный компрессор.

AUTOMATED PROCESS CONTROL SYSTEM HYDROGEN COMPRESSION

R.N. Fadeev

*Vladimir State University,
Russia, Vladimir, fadeevroman.shua@gmail.com*

The summary. It is noted that the results of the patent search indicate the existing interest in the problem of hydrogen compression for its subsequent use and the active search for technical solutions to this problem. The author analyzes the technological process of hydrogen compression using a membrane compressor as an object of automation. The article discusses the tools of the application development environment visualization editor for CODESYS V3.5 programmable controllers, which made it possible for the operator to remotely control the technological process.

Keywords: automated process control, hydrogen compression, membrane compressor.

Инновационно-технологическое развитие современного производства невозможно без широкого использования средств автоматизации. Автоматизация технологических процессов

и производств – один из способов решения проблемы кадрового голода. Внедрять автоматизированные и роботизированные решения в 2024 году планировало 75 % промышленных компаний [1].

Водород может быть использован как альтернативное топливо для транспорта и является важным сырьем в различных отраслях промышленности. Развитие водородных технологий является одним из приоритетных направлений исследований в нашей стране.

Водородные технологии – один из важных факторов развития современной энергетики. Водород имеет самую высокую плотность энергии по массе из всех известных видов топлива. На единицу массы водород содержит примерно в 3 раза больше энергии, чем обычные виды топлива, такие как бензин и природный газ, поэтому он был впервые обоснован как перспективное ракетное топливо К. Э. Циолковским и выбран для космических ракетных приложений. Правительство приняло стратегические решения о развитии водородной энергетики и утвердило документы, определяющие цели, задачи, инициативы и проекты на период до 2035 года и в перспективе до 2050 года [2].

Отечественные компании работают над проектами в области производства и использования водорода. Так компания «Росатом» развивает программу производства водородной энергии, строит производства водородных топливных элементов, ведет исследования в области использования водорода в транспорте (к примеру, поезд на водородных топливных элементах на Сахалине), в том числе создание водородных заправочных станций (развитие водородной заправочной инфраструктуры в Красноярском крае).

На территории России реализуются проекты по созданию инфраструктуры для использования водорода на транспорте. В Центре компетенций Национальной технологической инициативы «Новые и мобильные источники энергии» при ИПХФ РАН в подмосковной Черноголовке появилась первая в России автономная водородная заправочная станция, не зависящая от поставок баллонного водорода [3].

Заинтересована в решении задачи автоматизации технологического процесса компримирования водорода компания «Бакулин Моторс Групп». К 2028 году руководство компанией планирует развивать не только производство электробусов, но и водоробусов [4]. Для заправки экспериментальных моделей необходима водородная заправочная станция, потребуется водород высокого давления, минимум 350 атм.

Одним из технологических этапов производства и использования водорода является его компримирование (рис.1). Компримирование водорода позволяет повысить его удельную плотность и, следовательно, количество потенциально запасенной энергии.

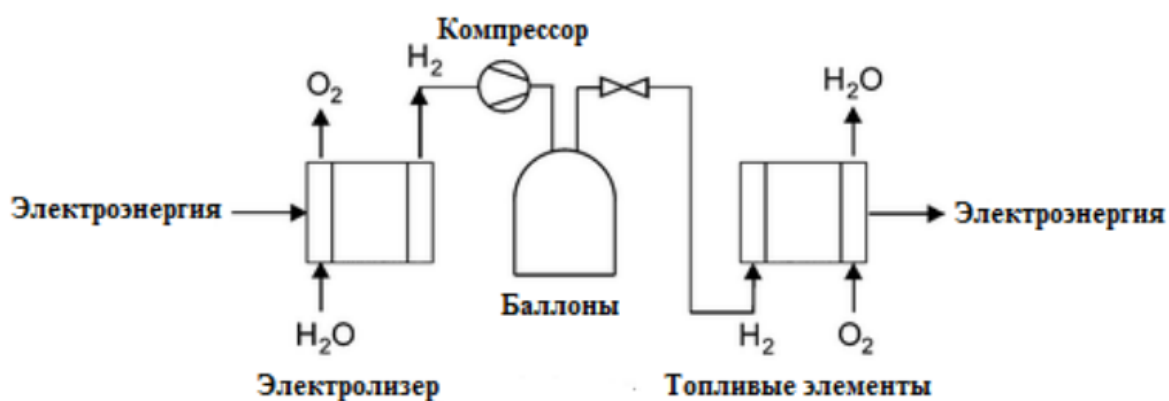


Рис. 1. Схема водородной системы аккумулирования энергии

Результаты патентного поиска свидетельствуют об имеющемся интересе к проблеме сжатия водорода для его последующего использования и об активных поисках технических решений этой задачи.

Работа с водородом сложнее, чем работа с другими техническими газами. По сравнению, например, с азотом водород имеет меньшую молекулярную массу и повышенную «летучесть», что увеличивает утечки газа при компрессии. Как следствие, компрессоры, герметичность которых зависит от зазоров в соединении металл-металл (центробежные, осевые, винтовые сухие), пригодны для перекачивания водорода только при сравнительно низких коэффициентах компрессии.

Для сжатия водорода до высокого давления могут быть использованы следующие виды компрессоров: механические (поршневой, мембранный) и немеханические (электрохимический, металлгидридный)

В настоящий момент в водородных заправочных станциях, в основном, применяются мембранные компрессоры. Использование металлгидридных компрессоров в инфраструктуре водородных заправочных станций является перспективным, но сейчас они не представлены на рынке оборудования для компримирования водорода с максимальным выходным давлением до 350-700 бар (созданы только прототипы и опытные образцы).

Рассмотрим технологический процесс компримирования водорода с использованием мембранного компрессора как объект автоматизации.

Процесс регулирования сжатия газа до конечного давления отражен на схеме (рис. 2). Поскольку объем вытесняемого в гидравлическую полость масла больше чем объем самой полости существует необходимость избавляться от излишков масла. Эту задачу выполняет перепускной клапан (ПК), при определенном давлении на входе клапан открывается и сбрасывает излишки гидравлической жидкости в картер компрессора. Поскольку с каждой фазой сжатия часть гидравлической жидкости будет удаляться из гидравлической полости компрессора, то ее количество будет быстро уменьшаться и станет недостаточным для создания необходимого давления. Для этого в компрессоре предусмотрен компенсационный насос (КН). В конце каждой фазы сжатия КН возвращает необходимое количество масла обратно в гидравлическую полость компрессора. Для предотвращения воздействия давления на выход КН во время фазы сжатия устанавливается невозвратный клапан (НК).

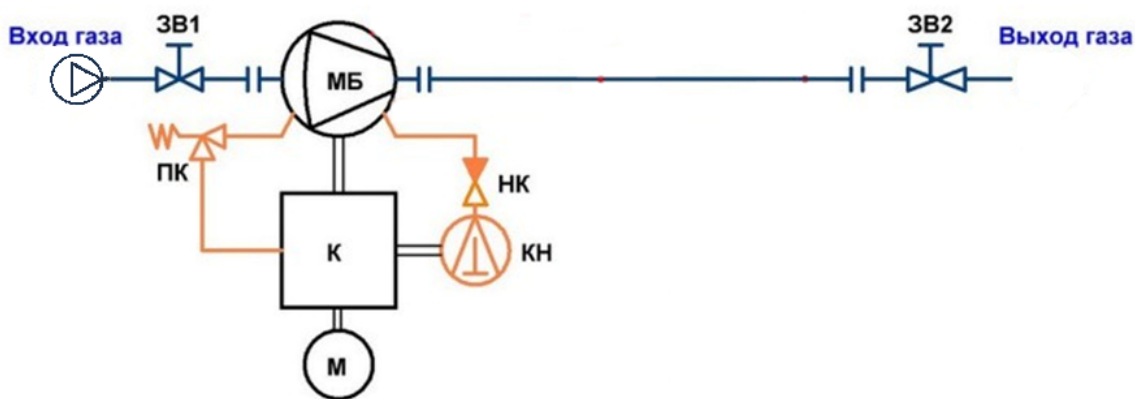


Рис. 2. Пневматическая схема мембранного компрессора, где ЗВ – запорный вентиль, МБ – мембранный блок, К – картер привода, М – электродвигатель, ПК - перепускной клапан, КН – компенсационный насос, НК – невозвратный клапан

Во время сжатия газа выделяется большое количество тепла, поэтому необходимо обеспечить его эффективный отвод для стабильной работы компрессора. Нагрев приводит к деформациям деталей и нарушению герметичности компрессора, что при работе с взрыво-

опасными газами может привести к их утечке. В мембранных компрессорах чаще всего применяется жидкостная система охлаждения, с использованием воды в качестве хладагента. Необходимо контролировать температуру охлаждающей жидкости (от 1°С до 32° С). Давление должно находиться в пределах 0.4 ... 0.6 МПа. Охлаждающая жидкость подается на все охлаждаемые компоненты компрессора, после чего собирается в едином коллекторе и отводится из компрессора (рис. 3).

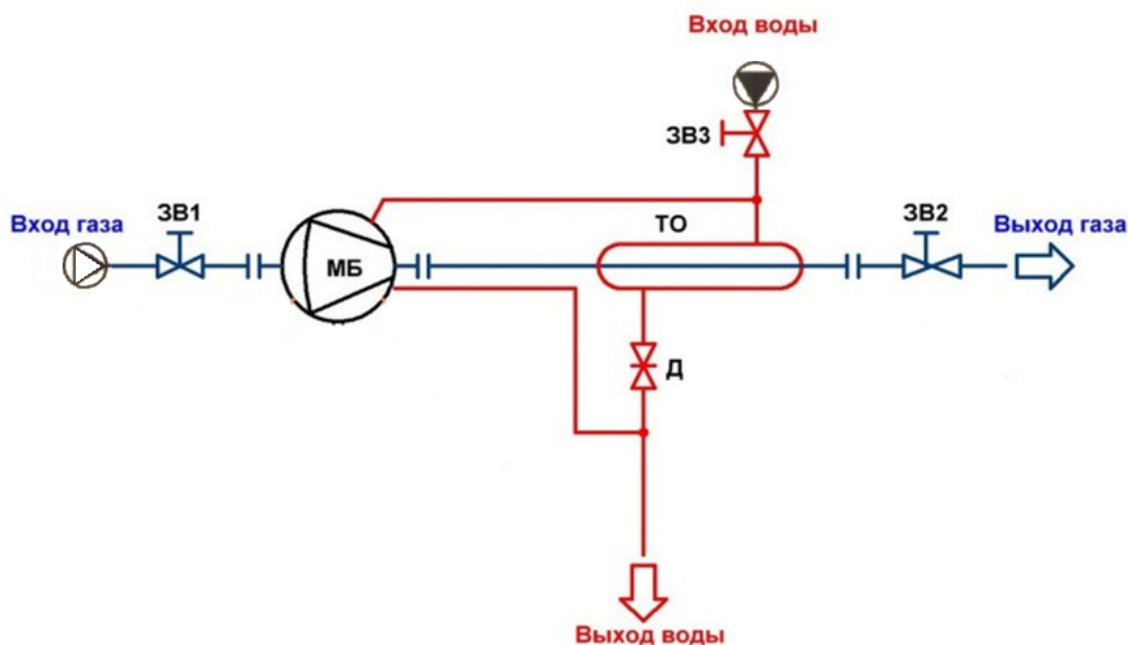


Рис. 3. Схема охлаждения мембранного компрессора, где ЗВ – запорный вентиль, ТО – теплообменник, Д – дроссель, МБ – мембранный блок

Автоматизированная система управления процессом компримирования водорода позволит осуществлять мониторинг, контроль и управление технологическими параметрами работы оборудования. К этим параметрам относятся температура газа и охлаждающей жидкости, а также давление газа и охлаждающей жидкости в системе.

Помимо этого АСУ должна сигнализировать об аварийных ситуациях (утечка газа, критический уровень температуры и давления, недостаточный поток охлаждающей жидкости и т.д.). АСУ формирует команды для управления оборудованием при возникновении внештатных ситуаций.

При проектировании АСУ техпроцессом построены структурная и функциональная схемы, подобраны средства автоматизации: контроллерное оборудование, датчики и исполнительные механизмы.

При проектировании программной реализация системы управления техпроцессом использована интегрированная среда разработки приложений для программируемых контроллеров CODESYS V3.5. Она имеет в своем составе редактор визуализации, с помощью которого была осуществлена возможность для оператора дистанционно контролировать технологический процесс и наблюдать изменения происходящие в нем.

На основном экране панели оператора имеются пиктограммы кнопок «Пуск» и «Стоп», отображается статус компрессора, присутствует информация об основных параметрах технологического процесса (давление газа на входе, давление газа на выходе, давление охлаждающей жидкости, температура газа, температура охлаждающей жидкости, концентрация газа в окружающей среде).

Предусмотрена возможность через меню на главном экране перейти к журналу техпроцесса и графикам измеряемых параметров технологического процесса, таким как давле-

ние и температура. В журнале учет событий ведется по датам и времени. Работу графического примитива «Таблица тревог», использованного для создания журнала событий и входящего в состав группы «Менеджер тревог» обеспечивает наличие в проекте компонента «Конфигуратор тревог» (редактор визуализации CODESYS V3.5).

Для построения графиков был использован графический примитив «Тренд» редактора визуализации CODESYS V3.5, что дало возможность наблюдать изменения параметров температуры и давления не только в реальном времени, но и использовать опцию просмотра истории.

При создании программной реализации АСУ ТП весь технологический процесс компримирования водовода рассматривался как сложная система, производилась ее декомпозиция на подсистемы, которые в свою очередь также разбивались на части. Использование библиотек OSCAT позволило упростить и ускорить процесс разработки, т.к. они предоставляют набор «строительных блоков» для кода. OSCAT – сокращение Open Source Community for Automation Technology («Сообщество открытого программного обеспечения для систем автоматизации»).

Библиографический список

1. <https://thehrd.ru/news/75-kompanij-v-borbe-s-deficitom-kadrov-sdelali-stavku-na-avtomatizaciyu/> – Дата доступа: 21.01.2025.
2. Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации <http://static.government.ru/media/files/5JFns1CDAKqYKzZ0mnRADAw2NqcVsexl.pdf> – Дата доступа: 21.01.2025.
3. <https://vodorod.pro/novosti/pervaya-rossijskaya-vodorodnaya-zaprav.html> – Дата доступа: 21.01.2025.
4. <https://www.interfax.ru/russia/932954> – Дата доступа: 21.01.2025.

УДК 004.94; ГРНТИ 50.41.25

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИ ДАННЫХ МНОГОПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОГО СЕРВИСА ПОДДЕРЖКИ КОГНИТИВНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Р.А. Исаев, А.И. Курочкина

*Брянский государственный технический университет,
Российская Федерация, Брянск, Ruslan-Isaev-32@yandex.ru*

Аннотация. Статья посвящена развитию программных средств поддержки процесса когнитивного моделирования. Рассмотрены особенности данного процесса, которые снижают эффективность однопользовательских программных средств, чем обоснована актуальность разработки соответствующего многопользовательского программного сервиса. Кратко сформулированы ключевые требования, касающиеся функциональных возможностей сервиса и организации хранения данных, и приведена предлагаемая концептуальная модель данных. Планируется создание рабочего прототипа сервиса, который позволит протестировать предложенную модель данных и оценить ее способность поддерживать все актуальные функции.

Ключевые слова: когнитивное моделирование, нечеткая когнитивная карта, многопользовательский сервис, модель данных.

SPECIFIC FEATURES OF THE DATA MODEL OF THE MULTIUSER COGNITIVE MODELING SUPPORT SERVICE

R.A. Isaev, A.I. Kurochkina

*Bryansk State Technical University,
Russia, Bryansk, Ruslan-Isaev-32@yandex.ru*

Abstract. The article is devoted to the development of software tools to support the process of cognitive modeling. The peculiarities of this process, which reduce the effectiveness of single-user software tools, are considered, which substantiates the relevance of developing a corresponding multi-user software service. The key requirements concerning functional capabilities of the service

and organization of data storage are briefly formulated and the proposed conceptual data model is given. It is planned to develop a working prototype of the service, which will allow to test the proposed data model and evaluate its ability to support all relevant functions.

Keywords: cognitive modeling, fuzzy cognitive map, multiuser service, data model.

Введение

Когнитивное моделирование представляет собой процесс построения и анализа специальной модели сложной системы (называемой когнитивной моделью), как правило, направленный на понимание устройства системы и выявление оптимального способа воздействия на эту систему с целью перевода ее в целевое состояние [6]. Этот подход учитывает взаимодействие различных факторов (концептов) и их влияние на поведение системы [1].

Объекты управления, требующие такого моделирования, часто характеризуются сложными взаимодействиями и множеством факторов, оказывающих влияние на их поведение. Поэтому требуется проводить вычисление и анализ значительного объема данных для получения показателей, используемых для исследования свойств анализируемой системы. В связи с этим программная поддержка процесса когнитивного моделирования играет ключевую роль, предоставляя эффективные инструменты для обработки, анализа и визуализации данных, связанных с когнитивной моделью.

В работе [2] представлено сравнение ряда существующих средств программной поддержки когнитивных моделей, одним из которых является однопользовательская система поддержки принятия решений (СППР) «ИГЛА» (Интеллектуальный Генератор Лучших Альтернатив) [3], предназначенная для генерации и отбора альтернативных стратегий управления слабоструктурированными системами на основе одной из разновидностей когнитивных моделей – нечетких когнитивных карт (НКК) Силова [4].

Актуальность разработки многопользовательского сервиса поддержки когнитивного моделирования

Процесс когнитивного моделирования имеет ряд особенностей, которые снижают эффективность однопользовательских программных средств его поддержки.

Во-первых, когнитивное моделирование в практическом применении представляет собой многопользовательский процесс, требующий участия как минимум одного эксперта в предметной области (который в простых случаях может одновременно выступать в роли заказчика или лица, принимающего решения) и специалиста по когнитивному моделированию. Таким образом, имеются необходимость организовывать взаимодействие как минимум двух участников. При построении моделей достаточно сложных систем количество экспертов может увеличиваться, а лицо, принимающее решения, может быть отдельным специалистом.

Во-вторых, участники процесса могут столкнуться с трудностями в организации совместной работы, поскольку они не всегда могут собраться в одном месте и в одно время, как это требуется для работы с СППР «ИГЛА» и другими однопользовательскими системами (например, это может быть связано с территориальной оторванностью участников). Альтернативные способы организации совместной работы, такие как онлайн-сессии с демонстрацией экрана, также имеют свои ограничения: в больших группах сложно согласовать время, когда все могут быть доступны. При оффлайн-работе с территориально распределенными участниками возникает необходимость постоянного обмена промежуточными результатами моделирования через внешние средства, что добавляет сложности в данный процесс.

В-третьих, при длительной работе со сложными когнитивными моделями возникает значительное количество файлов с различными версиями одной и той же модели. В условиях отсутствия внутренней «системы управления версиями» это приводит к путанице и усложня-

ет рабочий процесс, особенно когда количество участников велико и при этом возникает необходимость вернуться к одной из предыдущих версий.

В-четвертых, методы группового построения когнитивной модели, включая согласование ее структуры и параметров между разными экспертами, могут быть эффективно реализованы лишь в распределенной интерактивной многопользовательской среде.

Таким образом, все перечисленные особенности подчеркивают, что для эффективной организации процесса когнитивного моделирования наиболее подходящей является многопользовательская среда, что делает разработку соответствующего многопользовательского программного сервиса особенно актуальной.

Требования к многопользовательскому сервису, связанные с организацией хранения данных

В процессе разработки многопользовательского сервиса должны быть учтены следующие ключевые требования, касающиеся как организации хранения данных, так и функционала системы.

1. Обеспечение поддержки построения и анализа как нечетких когнитивных карт Силова, так и традиционных знаковых когнитивных карт [5].
2. Поддержка пользовательских аккаунтов, включая регистрацию, авторизацию и личный кабинет.
3. Поддержка концепции «проекта», представляющего собой совокупность тематически связанных когнитивных моделей, над которыми работает одна команда пользователей. Каждая когнитивная модель разрабатывается в рамках конкретного проекта, который, в свою очередь, может включать одну или несколько моделей.
4. Возможность управления ролями пользователей в проекте. Каждая роль определяет доступные пользователю действия с когнитивными моделями данного проекта. Роли назначает руководитель проекта, который также отвечает за создание самого проекта и набор участников в него.
5. Обеспечение возможности совместной работы над когнитивной моделью группой пользователей, в соответствии с их ролями.
6. Поддержка концепции «версии когнитивной модели», обеспечивающая систематизированное хранение промежуточных или альтернативных вариантов когнитивной модели как ее отдельных версий и возможность возврата к любой из них.
7. Поддержка формирования отчетов по результатам моделирования с возможностью гибкой настройки их содержимого.

Таким образом, разработка сервиса будет направлена на создание удобной и функциональной платформы, способствующей эффективному взаимодействию пользователей и оптимизации процесса когнитивного моделирования.

Предлагаемая модель данных для прототипа многопользовательского сервиса

В качестве основы для предложенной модели данных многопользовательского сервиса, представленной на рисунке 1, была использована модель данных, положенная в основу системы поддержки принятия решений «ИГЛА». При этом были внесены некоторые модификации, касающиеся обеспечения многопользовательского взаимодействия, а также осуществлен переход от использования XML-файлов к базе данных в качестве основного средства хранения данных.

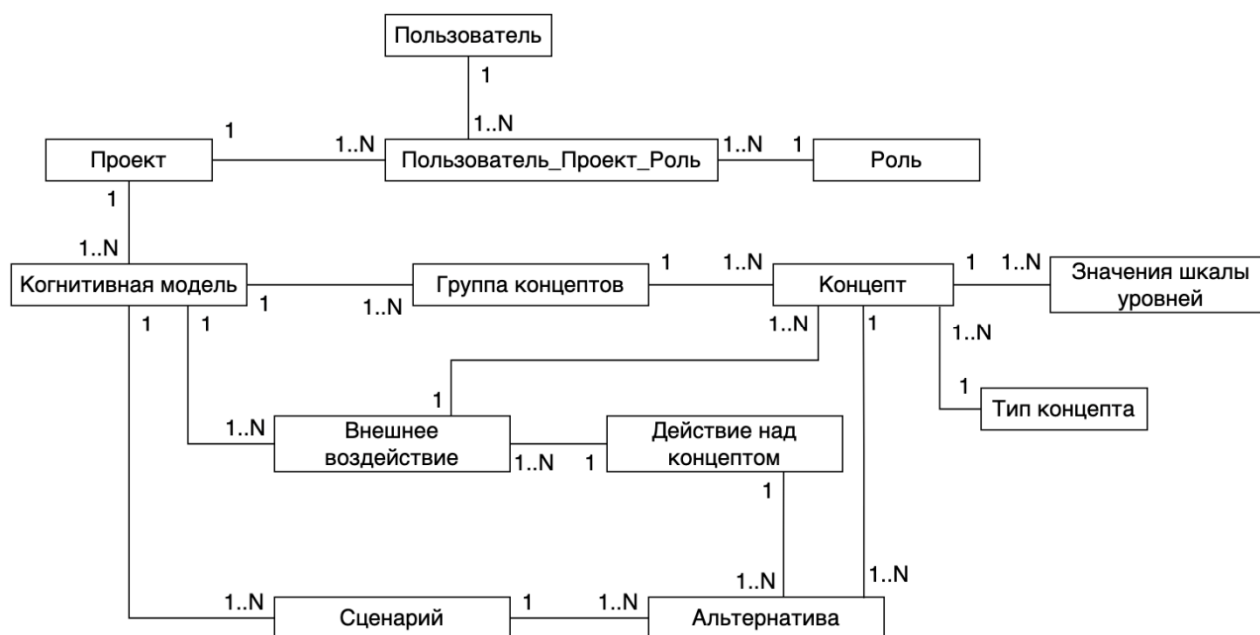


Рис. 1. Концептуальная модель данных для многопользовательского сервиса поддержки когнитивного моделирования

Сущности «Пользователь», «Проект» и «Роль» связаны через промежуточную таблицу «Пользователь_Проект_Роль». Это связано с тем, что один пользователь может принимать участие в нескольких проектах, в каждом проекте обычно участвует несколько пользователей, при этом у каждого пользователя может быть более одной роли в одном проекте (например, одновременно роли эксперта и аналитика).

Сущность «Когнитивная модель» имеет связь «много к одному» с сущностью «Проект», поскольку в рамках проекта может создаваться несколько когнитивных моделей. В свою очередь, связи «один ко многим» устанавливаются для сущностей «Группа концептов», «Внешние воздействия» и «Сценарий».

Сущность «Концепт» содержит информацию о концепте, который принадлежит группе концептов, созданной в рамках когнитивной модели. Каждый концепт относится к определенному типу и включает набор значений, соответствующих уровням шкалы.

Сущность «Внешние воздействия» хранит информацию о том, какие воздействия со стороны внешней среды оказываются на конкретные концепты, и каковы их параметры. В то же время, сущность «Альтернатива» также описывает действия, осуществляемые над концептами, но уже в контексте сгенерированных сценариев управления.

Выводы

В рамках работы были выявлены ключевые особенности процесса когнитивного моделирования, которые обосновывают и подчеркивают актуальность создания многопользовательского сервиса поддержки данного процесса. На основании их анализа были сформулированы основные требования к функционалу системы и лежащей в его основе модели данных, а также предложена концептуальная модель данных, которая станет основой для разработки будущего сервиса.

В качестве направлений дальнейших исследований можно перечислить следующие:

- создание рабочего прототипа сервиса, который позволит протестировать предложенную модель данных и оценить ее способность поддерживать все актуальные функции, включая многопользовательские возможности работы с когнитивными картами;

- разработка методов структурной и параметрической идентификации [6] когнитивной модели на основе мнений группы экспертов, для последующей реализации в составе сервиса;
- расширение предложенной модели данных для поддержки других типов когнитивных карт [5].

Библиографический список

1. 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
2. Кулинич А.А. Компьютерные системы моделирования когнитивных карт: подходы и методы // Проблемы управления. 2010. №3. С. 2-16.
3. Коростелев, Д.А. Система поддержки принятия решений на основе нечетких когнитивных моделей "ИГ-ЛА" / Д.А. Коростелев, Д.Г. Лагерева, А.Г. Подвесовский // КИИ-2008: Одиннадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием: труды конференции / Российская ассоциация искусственного интеллекта. Том 3. – Дубна: URSS, 2008. – С. 327-329. – EDN WLMJYB.
4. Силов В.Б. Принятие стратегических решений в нечеткой обстановке. – М.: ИНПРО-РЕС, 1995.
5. Борисов, В.В. Нечеткие модели и сети / В.В. Борисов, В.В. Круглов, А.С. Федулов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2012. – 284 с.
6. 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.

УДК 004.021; ГРНТИ 28.23.37

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ОБРАБОТКЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

А.В. Кочетков

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

Аннотация. В статье рассматривается применение нейросетевых технологий в обработке научно-технической информации с целью автоматизации рутинных процессов изобретательской деятельности. Предложен мультисервисный подход, объединяющий несколько специализированных нейросетевых решений в рамках единого веб-приложения, что способствует повышению продуктивности исследователей, снижению временных и финансовых затрат.

Ключевые слова: информационные системы и технологии, нейросетевые технологии, обработка информации.

THE USE OF NEURAL NETWORK TECHNOLOGIES IN THE PROCESSING OF SCIENTIFIC AND TECHNICAL INFORMATION

A.V. Kochetkov

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

The summary. The article discusses the use of neural network technologies in the processing of scientific and technical information in order to automate routine processes of inventive activity. A multiservice approach is proposed that combines several specialized neural network solutions within a single web application, which helps to increase the productivity of researchers, reduce time and financial costs.

Keywords: information systems and technology, neural network technologies, information processing.

Применение нейросетевых технологий в обработке научно-технической информации является одним из ключевых направлений цифровизации изобретательской деятельности. В современном мире объем данных, содержащихся в патентных базах, научных публикациях,

технической документации и отчетах о научно-исследовательских работах, постоянно увеличивается, что создает серьезные проблемы для изобретателей, исследователей и экспертов, которым необходимо быстро и эффективно анализировать информацию, выявлять актуальные тенденции и разрабатывать новые технические решения. Нейросети предоставляют мощные инструменты для автоматизации данных процессов.

Благодаря текущему уровню развития способностей к обработке больших объемов данных, выявлению закономерностей и обучению на примерах, искусственный интеллект (ИИ) способен значительно повысить производительность поиска и анализа информации. Однако, несмотря на очевидные преимущества, подобное применение в контексте изобретательской деятельности сопряжено с рядом специфических особенностей. Рассмотрим ключевые из них.

Особенности применения нейросетей в изобретательской деятельности

Вопрос авторства и прав на результаты, полученные с использованием нейросетей, остается предметом дискуссий. Согласно российскому законодательству, автором может быть только человек, а исключительное право на изобретение принадлежит автору или иному правообладателю. Однако, в ходе изобретательской деятельности с применением генеративных нейросетей, необходимо учитывать правовые аспекты использования исходных материалов для обучения ИИ. Например, загрузка чужих работ для обучения нейросети может считаться нарушением прав на интеллектуальную собственность. Юристами рекомендуется заключать лицензионные договоры с библиотечными системами и физическими лицами-авторами и указывать в них порядок использования произведений для целей машинного обучения [1].

Таким образом, возможно неосознанное задействие результатов чужих трудов в собственном изобретении, что грозит исследователю наступлением правовых последствий, оспариванию результатов и аннулированию патента даже в случае косвенного заимствования идей, если те подпадают под охрану патентным законодательством или иными нормами. По этой причине, взаимодействие с нейросетью на этапе создания изобретения в дальнейшем может значительно усложнить процесс внедрения и коммерциализации разработки.

Безусловно, нейросети могут анализировать большие объемы данных, выявлять закономерности и предлагать решения, однако их работа основана на алгоритмах и данных, зачастую предоставленных коммерческими организациями. Следовательно, результаты, полученные с помощью нейросетей, являются отражением кооперации человека и инструментальной программно-аппаратной платформы, которая сама по себе является объектом патентного права. Следственно, требуется определение конкретных ролей и ответственности, прав интеллектуальной собственности, необходима оценка вклада каждого участника в процесс изобретения [2].

Исходя из этого можно сделать вывод о том, что применение нейросетей в изобретательской деятельности требует внимательного подхода к правовым вопросам, тщательной проработки патентной документации и ясного понимания взаимодействия между человеком и искусственным интеллектом.

Анализ возможностей нейросетевых технологий в обработке научно-технической информации

Рассмотрим ключевые направления, где нейросети демонстрируют высокие результаты и потенциал развития. Одним из наиболее востребованных применений нейросетей является работа с естественным языком (NLP).

По некоторым данным, ежегодно в мире издается около 5 миллионов публикаций. Среднестатистический изобретатель тратит около 23% и более времени от всего процесса

научной работы на изучение данных из различных источников. Около 50 минут необходимо на детальное прочтение одной статьи из журнала с высоким импакт-фактором. Это же время увеличивается вдвое для литературы на иностранных языках [3]. По этой причине возрастает сложность исследований – объем информации растет, а исследователи и ученые вынуждены тратить все больше времени не только на поддержание актуальности своих знаний, но и на поиск и обзор литературы в ходе научных изысканий.

Именно для разрешения данных проблем, в целях быстрого нахождения и извлечения ключевой информации из научных статей и патентов, облегчения процесса поиска релевантной информации или ссылок на нее используются нейросетевые инструменты.

Например, модели вроде BERT или RoBERTa могут эффективно выявлять темы исследований, выводы авторов и рекомендовать схожие работы. Функция Deep Research в ChatGPT позволяет проводить более глубокие и тщательные исследования по определенной теме, улучшая качество анализа и расширяя объем информации, предоставляемой пользователю.

Современные системы машинного перевода, такие как Reverso или DeepL, основанные на нейросетях, способны переводить научные тексты с высокой точностью, особенно если речь идет о узкоспециализированных терминах, что помогает изобретателям быстрее обрабатывать актуальную информацию на иностранном языке.

Нейросети могут автоматически добавлять метки и аннотации к тексту, помогая исследователям лучше ориентироваться в больших массивах данных. Примером такой технологии являются сервисы автоматической разметки цитат и ссылок: Label Studio и LightTag.

Однако использование вышеперечисленных инструментов зачастую затруднено высокой стоимостью и ограниченной доступностью.

Основными факторами, обуславливающими дороговизну нейросетей, являются высокая вычислительная сложность, необходимость значительных объемов данных для обучения, а также затраты на специализированное аппаратное обеспечение. Современные модели глубокого обучения требуют использования мощных графических процессоров (GPU) или специализированных ускорителей, таких как тензорные процессоры (TPU), что существенно увеличивает стоимость их эксплуатации. Кроме того, значительные финансовые и временные ресурсы расходуются на сбор, обработку и разметку данных, что особенно актуально для нейросетей, в которых качество входных данных играет критическую роль [4].

Ограниченная доступность нейросетевых технологий обусловлена не только их высокой стоимостью, но и сложностью разработки и настройки моделей. Для эффективной разработки нейросетей необходимы специалисты, обладающие глубокими знаниями в области машинного обучения, математики и программирования, что создает дополнительный барьер для организаций, не обладающих соответствующими кадровыми ресурсами.

Также следует учитывать, что ведущие компании, занимающиеся разработкой передовых нейросетевых моделей, часто ограничивают их свободное распространение, предоставляя доступ к ним только на коммерческой основе, что усиливает проблему доступности для малого и среднего бизнеса, образовательных учреждений и научных организаций. В совокупности эти факторы создают значительные препятствия для массового внедрения нейросетей, делая их преимущественно инструментом крупных корпораций и специализированных исследовательских центров.

Мультисервисный подход

В подобных условиях альтернативой стандартному коммерческому использованию нейросетей с оптимальным соотношением цена-результат может выступать мультисервисный подход к использованию нейросетевых технологий в обработке научно-технической информации, заключающийся в интеграции нескольких специализированных нейросетей в единое веб-приложение, что позволяет автоматизировать выполнение монотонных, рутин-

ных и однообразных задач изобретательской деятельности, не требующих творческой деятельности.

Вместе с тем, внедрение для вышеуказанных целей именно условно-бесплатных решений даже в ограниченном режиме в одно приложение-сервис позволяет не только обеспечить повышение продуктивности изобретателя, но и значительно минимизирует расходы в сравнении с полностью платными бизнес-тарифами, а масштабируемость системы за счёт сочетания различных моделей машинного обучения, каждая из которых решает свою узконаправленную задачу (например, обработку естественного языка, семантического анализа, машинного перевода), способствует дальнейшему увеличению количества упрощаемых задач.

Например, применение подобного подхода в изобретательской деятельности уже предоставляет возможности [5]:

- автоматизированного патентного поиска: анализ патентных баз данных, выявление схожих решений и формирование отчетов;
- классификации и систематизации научно-технической информации: сортировка документов, выделение ключевых концепций и структурирование данных;
- генерации технических описаний: автоматическое составление черновиков заявок на изобретения;
- анализа рыночных и технологических тенденций: выявление перспективных направлений разработки на основе анализа баз публикаций и патентов.

Выбор данного направления также создает предпосылки для реализации потенциала нейросетевых инструментов независимыми исследователями и изобретателями. Вместо дорогостоящих коммерческих систем, специалисты могут использовать комбинацию сильных сторон открытых или частично бесплатных нейросетей, адаптированных для решения конкретных задач.

Таким образом, мультисервисный подход способствует повышению производительности, снижению издержек и более эффективному управлению информационными потоками, что делает его востребованным инструментом в сфере изобретательской деятельности.

Заключение

Использование нейросетевых технологий в обработке научно-технической информации открывает широкие перспективы для автоматизации изобретательской деятельности. Применение искусственного интеллекта позволяет значительно ускорить поиск, анализ и систематизацию научных данных, что особенно актуально в условиях постоянного роста объёмов информации. Однако высокий уровень вычислительных затрат, сложность разработки моделей и правовые вопросы, связанные с интеллектуальной собственностью, создают серьёзные препятствия для массового внедрения этих технологий.

В данной работе рассмотрен мультисервисный подход, заключающийся в интеграции нескольких специализированных нейросетевых решений в рамках одного веб-приложения. Этот метод позволяет автоматизировать рутинные процессы, такие как патентный поиск, обработка научных публикаций, машинный перевод и семантический анализ, снижая временные и финансовые затраты пользователей.

Применение условно бесплатных нейросетей в данном подходе делает его доступным как для небольших организаций, так и для независимых исследователей. Прикладное значение результатов данной работы заключается в том, что предложенный мультисервисный подход может быть использован для создания эффективных инструментов поддержки изобретательской деятельности. Он позволяет уменьшить нагрузку на исследователей, минимизировать риски правовых коллизий, а также повысить качество и скорость обработки научно-технической информации. Внедрение подобного решения способствует более эффективному

управлению информационными потоками и стимулирует развитие инновационных технологий.

Библиографический список

1. Головоломка: взгляд юристов на искусственный интеллект // Адвокатская газета URL: https://www.advgazeta.ru/ag-expert/news/golovolomka-vzglyad-yuristov-na-iskusstvennyu-intellekt/?utm_source (дата обращения: 04.02.2025).
2. Искусственный интеллект в патентно-информационной работе. Риски и перспективы // Юридическая фирма «Городиский и Партнеры» URL: https://www.gorodissky.ru/publications/articles/iskusstvennyu-intellekt-v-patentno-informatsionnoy-rabote-riski-i-perspektivy/?utm_source (дата обращения: 04.02.2025).
3. Анализ научных текстов на сверхчеловеческой скорости // Кибертида URL: <https://cybertida.ru/> (дата обращения: 12.03.2025).
4. Искусственный интеллект (мировой рынок) // TADVISER URL: https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F:%D0%98%D1%81%D0%BA%D1%83%D1%81%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%B8%D0%BD%D1%82%D0%B5%D0%BB%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82_%28%D0%BC%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9_%D1%80%D1%8B%D0%BD%D0%BE%D0%BA%29 (дата обращения: 19.03.2025).
5. Gpt-4 technical report // arXiv URL: <https://arxiv.org/abs/2303.08774v6> (дата обращения: 23.03.2025).

УДК 004.652.6; ГРНТИ 50.51.17

ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО ОБРАБОТКИ ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛА И СИГНАЛА ДЫХАНИЯ

А.А. Кресникова, Т.А. Витязева

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

Аннотация. В данной работе рассмотрены вопросы анализа variability сердечного ритма и ее взаимосвязи с дыхательной активностью. Разработана функциональная модель обработки сигналов, включающая этапы регистрации, предварительной обработки, выделения характерных точек и формирования временных рядов. Предложено программное обеспечение, автоматизирующее анализ биомедицинских данных, обеспечивающее синхронизацию сигналов и их структурированное хранение. Разработана логическая модель базы данных.

Ключевые слова: биомедицинские сигналы, электрокардиосигнал, пневмограмма, variability сердечного ритма, спектральный анализ, дыхательная аритмия, синхронная регистрация, функциональная модель, программное обеспечение, базы данных.

SOFTWARE PROCESSING TOOL ELECTROCARDIOGRAM AND RESPIRATORY SIGNAL

A. A. Kresnikova, T.A. Vityazeva

*Ryazan State Radio Engineering University named after V. F. Utkin,
Russian Federation, Ryazan, vnedostupa@yandex.ru*

Annotation. In this paper, the issues of analyzing heart rate variability and its relationship with respiratory activity are considered. A functional model of signal processing has been developed, which includes the stages of registration, preprocessing, identification of characteristic points and formation of time series. Software has been proposed that automates the analysis of biomedical data, provides synchronization of signals and their structured storage. A logical database model has been developed.

Keywords: biomedical signals, electrocardiogram, pneumogram, heart rate variability, spectral analysis, respiratory arrhythmia, synchronous registration, functional model, software, databases.

Биомедицинские сигналы представляют собой физиологические показатели, которые регистрируются и анализируются в медицине для диагностики и мониторинга состояния пациента. Эти сигналы могут быть электрическими (ЭКГ, ЭЭГ), механическими (артериальное

давление, пульс), оптическими (плетизмограмма) и химическими (уровень кислорода и глюкозы в крови). Анализ таких сигналов позволяет выявлять патологические изменения в работе организма, оценивать его функциональное состояние и разрабатывать персонализированные методы лечения.

Среди множества биомедицинских сигналов особый интерес представляют электрокардиосигнал (ЭКС) и сигнал дыхания или пневмограмма (ПГ). Учет респираторно-кардиальных взаимоотношений позволяет более адекватно оценить реакцию сердечнососудистой системы на внешние воздействия (физическая нагрузка, психологические напряжения и т.п.).

В настоящее время для оценки такой реакции широко применяются методы анализа variability сердечного ритма (ВСР), в частности метод спектрального анализа. Сравнение мощностей спектральных составляющих ВСР в низкочастотном (LF) диапазоне (0,04 – 0,15 Гц) и высокочастотном (HF) диапазоне (0,15 – 0,4 Гц) позволяет оценивать степень напряженности регуляторных систем организма [1]. При этом надо учитывать степень взаимосвязи кардиоритмограммы и пневмограммы [2]. Кардиоритмограмма представляет собой временной ряд длительностей циклов сердечных сокращений, измеряемых обычно между R-зубцами соседних циклов электрокардиограммы и называемых поэтому RR-интервалами. Для повышения достоверности оценки взаимосвязи кардиоритмограммы и пневмограммы необходимо обеспечить синхронную регистрацию кардиоритмограммы и пневмограммы [3].

Современные информационные технологии позволяют автоматизировать процесс обработки и анализа сигналов кардиоритмограммы и пневмограммы и создать специализированную базу данных для хранения полученных результатов.

Функциональная модель

Для обеспечения достоверного анализа variability сердечного ритма (ВСР) и влияния дыхания на работу сердечно-сосудистой системы разработана функциональная модель обработки биомедицинских сигналов. Данная модель позволяет автоматизировать процессы регистрации, предварительно обработать сигналы, реализовать процессы анализа и визуализации электрокардиосигнала и пневмограммы, что позволит повысить точность диагностики и сократить время обработки данных.

Модель включает несколько ключевых этапов, каждый из которых играет важную роль в получении качественных данных для анализа (рисунок 1).

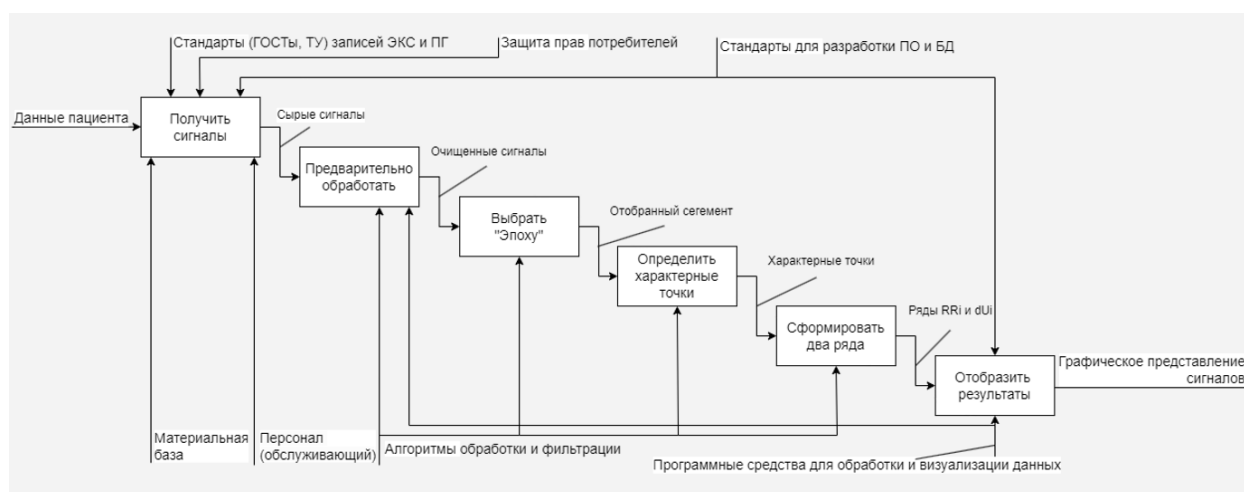


Рис. 1. Функциональная модель обработки биомедицинских сигналов

1. Получение сигнала

На данном этапе после регистрации пациента в медучреждении определяется лаборатория, врач и оборудование для снятия сигналов ЭКС и ПГ. Синхронная регистрация обоих сигналов критически важна для точности последующего анализа. Для регистрации сигналов применяются медицинские приборы, сертифицированные по ГОСТ и ТУ, что гарантирует требуемую точность измерений.

Входные данные: данные пациента (ФИО, возраст, состояние здоровья).

Выходные данные: зарегистрированные сигналы ЭКГ и ПГ.

2. Предварительная обработка

На данном этапе производится фильтрация сигналов с целью удаления шумов, исправления возможных смещений и подготовки данных для анализа. Применяются алгоритмы цифровой фильтрации, такие как:

- Фильтр высоких частот – для устранения низкочастотных помех, связанных с движениями пациента, а также для коррекции дрейфа изолиний.
- Фильтр низких частот – для подавления сетевых помех (50 Гц).

Входные данные: исходные зарегистрированные сигналы ЭКГ и ПГ.

Выходные данные: сигналы с исключенными высокочастотными и низкочастотными помехами.

3. Выбор «эпохи»

На этом этапе сигнал разбивается на отдельные временные интервалы, после чего выбирается наиболее стабильный участок, содержащий качественные данные и ЭКГ, и ПГ.

- Применяются методы сегментации временных рядов (например, скользящее окно, динамический пороговый анализ).
- Используются алгоритмы детектирования стабильных участков, основанные на статистическом анализе (например, вычисление среднеквадратичного отклонения амплитуды).

Входные данные: сигналы с исключенными высокочастотными и низкочастотными помехами.

Выходные данные: отобранные сегменты сигналов.

4. Определение характерных точек

На этом этапе выделяются ключевые элементы сигналов. Для ЭКГ определяются R-пики, используемые для расчета интервалов RR, а для ПГ – характерные точки вдоха и выдоха. Это позволяет анализировать влияние дыхания на сердечный ритм. Применяются:

- Для ЭКГ: определение R-зубцов с помощью пикового детектора, который анализирует локальные максимумы и интервалы между ними.
- Для ПГ: детекция фаз дыхания и вычисление изменений амплитуды дыхательного сигнала.

Входные данные: отобранный сегмент сигналов.

Выходные данные: характерные точки сигналов.

5. Формирование двух рядов

На основе найденных характерных точек формируются два временных ряда [4]:

- RR_i (кардиоритмограмма) – временные интервалы между R-зубцами, содержащие информацию о вариабельности сердечного ритма.
- dU_i (дыхательная активность) – изменения дыхательного сигнала между циклами.

Входные данные: характерные точки сигналов.

Выходные данные: два временных ряда – RR_i и dU_i .

6. Отображение результатов

На основе полученных данных строятся графики, определяются спектральные характеристики и корреляционные зависимости между кардиоритмограммой и пневмограммой, позволяющие оценить работу вегетативной нервной системы пациента.

Входные данные: два временных ряда кардиоритмограмма и пневмограмма (RR_i и dU_i).

Выходные данные: графическое представление сигналов.

Разработка программного обеспечения для анализа ЭКГ и ПГ

В целях автоматизации процессов регистрации, обработки и анализа кардиоритмограммы и пневмограммы разработано специализированное программное обеспечение (ПО). ПО входит в программный комплекс, который включает базу данных (БД), обеспечивающую структурированное хранение информации о пациентах, врачах, результатах исследований, а также инструментальные средства для анализа полученных сигналов.

Разработка ПО обусловлена необходимостью автоматизации обработки данных, повышения точности, надежности и эффективности анализа ЭКГ и ПГ. Основные задачи программного комплекса:

1. Автоматизацию обработки данных. Минимизация субъективного влияния оператора на интерпретацию данных за счет применения автоматизированных методов анализа.
2. Обеспечение надежного хранения данных. Хранение как необработанных сигналов, так и результатов их анализа позволяет выполнять повторные расчеты при изменении методик обработки. Ведение журнала калибровки оборудования, необходимого для контроля корректности измерений.
3. Совместный анализ кардиоритмограммы и пневмограммы. Для оценки их взаимосвязи в БД сохраняются временные ряды RR_i (интервалы между сердечными сокращениями) и dU_i (изменения дыхательного сигнала), что позволяет применять корреляционный анализ.

Структура базы данных

Логическая модель базы данных приведена на рисунке 2.

База данных содержит набор таблиц, организующих структурированное хранение информации:

- *Пациент, Врач, Поликлиника, Регистратура* – сведения о пользователях системы.
- *График работы врачей* – данные о расписании медицинского персонала.
- *Лаборатория, Оборудование, Журнал калибровки оборудования* – контроль за условиями проведения измерений.
 - *Сеанс, ЭКГ данные, ПГ данные, Результаты анализа* – хранение первичных и обработанных сигналов.
 - *Диагноз, Хронические заболевания, Рекомендации по лечению* – сведения о состоянии пациента и возможных назначениях.
 - *Вид деятельности, Вид деятельности-пациент* – информация о физиологических особенностях пациента, влияющих на анализ данных.

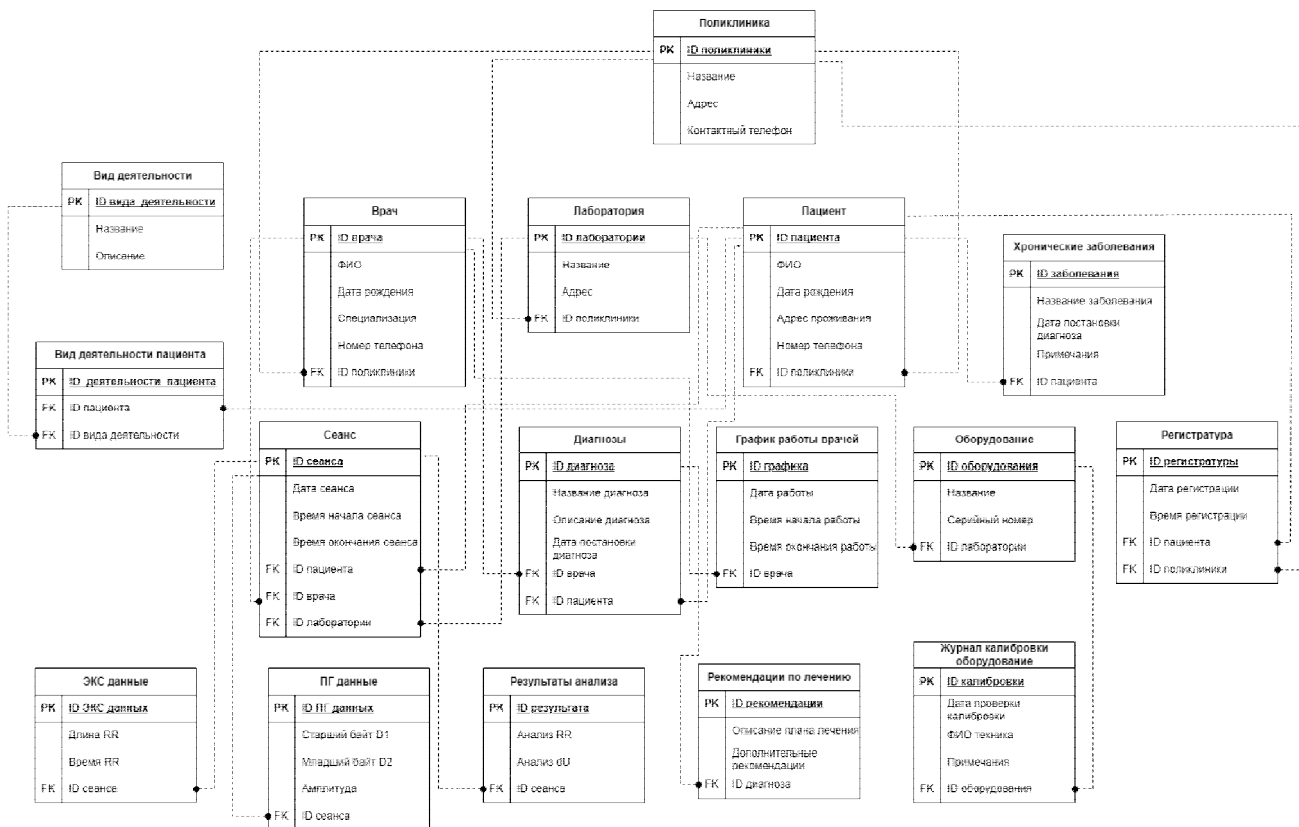


Рис. 2. Глобальная логическая модель базы данных

Заключение

В работе рассмотрены аспекты обработки биомедицинских сигналов. Разработана функциональная модель обработки электрокардиосигнала и пневмограммы, которая позволяет повысить точность диагностики и сократить время обработки данных. Разработано специализированное программное обеспечение, которое автоматизирует анализ биомедицинских сигналов и обеспечивает их синхронизацию и структурированное хранение. Предложена глобальная логическая модель базы данных.

Библиографический список

1. Task Force of the European Society of Cardiology and North American Society of Pacing and Electrophysiology. Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation and clinical use / European Heart Journal (1996) 17, 354-381.
2. Патент № 2392848 (РФ) А61В 5/0205, А61В 5/0204. Способ диагностики стресса у человека / Р.П. Карасев, М.М. Лапкин. Оpubл. 27.06.2010. Бюл. № 18. 7с.
3. Патент № 2722263(РФ) Способ формирования синхронизированных последовательностей кардиоинтервалограммы и пневмограммы и устройство для его осуществления /Т.А. Витязева, А.А. Михеев. А61В 5/0205, А61В 5/0456. Оpubл. 28.05.2020. Бюл. № 16. 17 с.
4. Витязева Т.А. Методы многоскоростной обработки сигналов в задачах анализа variability сердечного ритма // Цифровая обработка сигналов. – 2020. – №4. – С. 72–79. – [Электронный ресурс]: http://www.dsps.ru/articles/year2022/jour22_4/art22_4_9.pdf.

УДК 378.147; ГРНТИ 28.23.35

МУЛЬТИАГЕНТНАЯ СИСТЕМА ОЦЕНИВАНИЯ ГРУППОВЫХ ПРОЕКТОВ В РАМКАХ МЕЖДУНАРОДНЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ (НА ПРИМЕРЕ ERASMUS+)

А.С. Бурмистров, В.В. Белов

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, alexanderfiser@gmail.com*

Аннотация. В статье предложена мультиагентная система оценивания групповых проектов, направленная на повышение объективности и прозрачности в образовательном процессе. Система учитывает индивидуальный вклад каждого участника через автоматизированный сбор и анализ данных, включая активность, качество работы и лидерские качества. Особое внимание уделено интеграции с международными стандартами, такими как ECTS, что делает систему применимой в рамках программ Erasmus+. Рассмотрены преимущества системы, включая ее масштабируемость и адаптивность, а также возможные ограничения, связанные с технической реализацией. Статья предлагает перспективы дальнейшего развития системы с использованием технологий искусственного интеллекта.

Ключевые слова: мультиагентная система, оценивание групповых проектов, объективность оценивания, индивидуальный вклад, ECTS, Erasmus+, анализ данных, автоматизация оценивания, лидерские качества, образовательные технологии.

MULTI-AGENT SYSTEM FOR ASSESSING GROUP PROJECTS IN INTERNATIONAL EDUCATIONAL PROGRAMS (CASE STUDY: ERASMUS+)

A.S. Burmistrov, V.V. Beloff

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, alexanderfiser@gmail.com*

The summary. The paper proposes a multi-agent system for assessing group projects, aimed at enhancing objectivity and transparency in the educational process. The system takes into account the individual contribution of each participant through automated data collection and analysis, including activity, work quality, and leadership skills. Special attention is paid to integration with international standards, such as ECTS, making the system applicable within Erasmus+ programs. The advantages of the system, including its scalability and adaptability, are discussed, along with potential limitations related to technical implementation. The article outlines prospects for further development of the system using artificial intelligence technologies.

Keywords: multi-agent system, group project assessment, objective evaluation, individual contribution, ECTS, Erasmus+, data analysis, automated assessment, leadership skills, educational technologies.

В современном мире образование становится все более глобализированным, а программы международного обмена, такие как Erasmus+, играют ключевую роль в развитии межкультурного взаимодействия и академической мобильности. Одной из важнейших задач в рамках таких программ является объективное и прозрачное оценивание успеваемости студентов, особенно в условиях групповой работы, которая становится неотъемлемой частью образовательного процесса.

Однако традиционные методы оценивания зачастую не учитывают индивидуальный вклад каждого участника, что приводит к субъективности и несправедливости в оценках. Это особенно актуально в мультикультурных группах, где различия в образовательных подходах и культурных нормах могут влиять на восприятие и оценку работы.

Разработка мультиагентной системы оценивания, которая автоматически анализирует вклад каждого студента, позволяет не только повысить объективность, но и обеспечить соответствие международным стандартам, таким как ECTS (European Credit Transfer and Accumulation System). Это делает тему особенно актуальной для интеграции в программы Erasmus+ и другие международные образовательные инициативы.

Кроме того, использование современных технологий, таких как искусственный интеллект и анализ данных, открывает новые возможности для создания адаптивных и гибких

систем оценивания, которые могут быть легко масштабированы и внедрены в различные образовательные контексты.

Цель статьи: предложить мультиагентную систему оценивания, которая учитывает вклад каждого участника и соответствует стандартам Erasmus+.

В современной образовательной практике широко применяются различные методы оценивания групповых проектов, каждый из которых имеет свои особенности, преимущества и ограничения. Традиционный подход, основанный на оценивании итогового результата работы группы, отличается простотой реализации и минимальными временными затратами. Однако он не учитывает индивидуальный вклад каждого участника, что зачастую приводит к несправедливости в оценках. В таких случаях активные студенты, внесшие значительный вклад, могут получить ту же оценку, что и те, чье участие было минимальным.

В качестве альтернативы используется метод самооценивания и взаимного оценивания, при котором студенты оценивают как свой вклад, так и вклад своих коллег. Этот подход позволяет учитывать мнение участников и повышает их вовлеченность в процесс. Тем не менее, он подвержен субъективности, поскольку оценки могут быть искажены личными отношениями между студентами. В условиях мультикультурных групп, характерных для международных программ, таких как Erasmus+, дополнительные сложности возникают из-за различий в восприятии справедливости и культурных норм.

Еще одним подходом является оценивание на основе активности, при котором учитываются количественные показатели, такие как количество выполненных задач или участие в обсуждениях. Этот метод позволяет снизить субъективность за счет использования объективных данных, однако он не учитывает качество работы и лидерские качества участников, что может привести к неполной оценке их вклада.

С развитием цифровых технологий появились более сложные методы, предполагающие использование систем управления обучением и других инструментов для сбора и анализа данных о работе студентов. Такие подходы позволяют автоматизировать процесс оценивания и снизить влияние человеческого фактора. Однако их внедрение требует значительных технических ресурсов и подготовки преподавателей, что ограничивает их широкое применение.

Особого внимания заслуживает опыт международных образовательных программ, таких как Erasmus+, где используется система ECTS. Эта система обеспечивает унификацию оценивания и упрощает процесс перевода баллов между университетами-партнерами. Однако в рамках этой системы отсутствуют стандартизированные методы для оценивания групповых проектов, что затрудняет объективное распределение баллов между участниками.

Предлагаемая система оценивания групповых проектов основана на использовании мультиагентных технологий, что позволяет автоматизировать процесс сбора и анализа данных о деятельности каждого участника. Основная идея системы заключается в создании сети программных агентов, каждый из которых отвечает за мониторинг определенных аспектов работы студента: активности, качества выполнения задач и лидерских качеств. Такой подход обеспечивает комплексное оценивание, учитывающее как количественные, так и качественные показатели.

Активность участников измеряется с помощью анализа данных, собираемых в цифровой образовательной среде. Это включает количество выполненных задач, участие в обсуждениях, время, затраченное на выполнение заданий, и другие метрики. Для оценки качества работы используются как автоматизированные методы (например, анализ текстовых ответов с использованием технологий обработки естественного языка), так и экспертные оценки преподавателей. Лидерские качества оцениваются на основе анализа ролей, которые участники принимают в группе, таких как инициативность, организация работы и разрешение конфликтов.

Ключевым элементом системы является алгоритм расчета индивидуального вклада, основанный на взвешенной сумме показателей. Формула для расчета итогового балла участника i выглядит следующим образом:

$$S_i = \alpha \cdot A_i + \beta \cdot Q_i + \gamma \cdot L_i$$

где S_i — итоговый балл;

A_i — показатель активности;

Q_i — показатель качества работы;

L_i — показатель лидерских качеств;

α , β и γ — весовые коэффициенты, определяющие значимость каждого параметра. Значения коэффициентов могут быть адаптированы в зависимости от специфики проекта и требований образовательной программы.

Пример расчета индивидуального вклада для группы студентов по предложенной методике приведен в таблице 1.

Таблица 1. Пример расчета индивидуального вклада

Участник	Активность (A_i)	Качество (Q_i)	Лидерство (L_i)	Итоговый балл (S_i)
Студент 1	8	9	7	8.1
Студент 2	6	8	6	6.8
Студент 3	9	7	8	8.0
Студент 4	7	6	5	6.2
Студент 5	5	5	4	4.9

Весовые коэффициенты: $\alpha = 0.4$, $\beta = 0.4$, $\gamma = 0.2$.

Для обеспечения прозрачности и объективности система также включает механизмы обратной связи, позволяющие участникам ознакомиться с промежуточными результатами и при необходимости скорректировать свою работу.

Предлагаемая мультиагентная система оценивания групповых проектов обладает рядом значительных преимуществ. Во-первых, она обеспечивает высокий уровень объективности за счет автоматизированного сбора и анализа данных, что минимизирует влияние субъективных факторов на итоговые оценки. Во-вторых, система учитывает индивидуальный вклад каждого участника, что позволяет более справедливо распределять баллы и мотивировать студентов к активному участию. В-третьих, интеграция с международными стандартами делает систему совместимой с требованиями программ Erasmus+ и других международных инициатив, упрощая процесс перевода баллов между университетами. Наконец, использование современных технологий, таких как обработка естественного языка и анализ данных, позволяет адаптировать систему к различным образовательным контекстам и масштабировать ее для больших групп студентов.

Однако внедрение системы также связано с определенными ограничениями. Одним из основных недостатков является необходимость значительных технических ресурсов для ее реализации, включая разработку программного обеспечения и обучение преподавателей. Кроме того, система требует постоянного мониторинга и корректировки параметров, таких как весовые коэффициенты, чтобы обеспечить их соответствие специфике каждого проекта. Также важно учитывать, что автоматизированные методы оценки, несмотря на их объективность, могут быть ограничены в анализе творческих или нестандартных работ, где человеческий фактор остается незаменимым.

Разработка и внедрение мультиагентной системы оценивания групповых проектов представляют собой значительный шаг в направлении повышения объективности, прозрачности и справедливости в образовательном процессе. Предложенный подход, основанный на автоматизированном сборе и анализе данных, не только учитывает индивидуальный вклад каждого участника, но и обеспечивает совместимость с международными стандартами. Несмотря на необходимость технических ресурсов и адаптации к специфике образовательных контекстов, система открывает новые возможности для совершенствования методов оценивания в условиях глобализованного образования. Дальнейшие исследования могут быть направлены на интеграцию технологий искусственного интеллекта для повышения эффективности и универсальности.

Библиографический список

1. Европейская ассоциация университетов (EUA). Рекомендации по внедрению ECTS в высшем образовании. — Брюссель: EUA Publications, 2020. — 95 с.
2. Европейская комиссия. Руководство по программе Erasmus+. — Брюссель: Издательство Европейского союза, 2021. — 120 с.
3. Овсяницкая Л.Ю., Никитина Е.Ю., Лысенко Ю.В., Подповетная Ю.В., Постовалова И.П., Овсяницкий А.Д., Технология анализа и визуализации многомерных данных педагогического мониторинга в высшем образовании // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2018. №4.
4. Сафонцева Н.Ю., Кривенко-бахмутская Ю.Н. Искусственный интеллект в образовании: технологические смыслы и ценностные риски // Ценности и смыслы. 2025. №1
5. Темкин И.О., Леонтьева А.В., Методика оценки высшего профессионального образования с использованием методов мультиагентного моделирования // ГИАБ. 2011. №56.

УДК 004.032.26; ГРНТИ 28.23.37

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

М.А. Федулов, В.В. Белов

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, fmikhail1199@gmail.com*

Аннотация. В статье рассматривается влияние нейронных сетей на процессы разработки и тестирования программного обеспечения. Обсуждаются основные преимущества автоматизации, такие как ускорение выявления ошибок и сокращение времени выхода продукта на рынок. Нейронные сети, включая трансформеры и глубокие нейронные сети, применяются для автоматической генерации кода, автодополнения и рефакторинга. Также рассматривается их роль в автоматизации тестирования, включая генерацию тестов и анализ покрытия кода. Несмотря на существующие ограничения, такие как сложность настройки и зависимость от качества данных, использование нейронных сетей открывает новые горизонты для повышения эффективности разработки и улучшения качества конечного продукта.

Ключевые слова: нейронные сети, автоматизация, разработка ПО, тестирование, генерация кода, автодополнение, трансформер.

SOFTWARE DEVELOPMENT USING NEURAL NETWORKS

M.A. Fedulov, V.V. Belov

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, fmikhail1199@gmail.com*

The summary. The article examines the influence of neural networks on software development and testing processes. The main benefits of automation are discussed, such as faster error detection and shorter time to market. Neural networks, including transformers and deep neural networks, are used for automatic code generation, autocompletion and refactoring. Their role in automating testing, including test generation and code coverage analysis is also discussed. Despite the existing limitations, such as the complexity of configuration and dependence on data quality, the use of neural networks opens new horizons for improving the efficiency of development and improving the quality of the final product.

Keywords: neural networks, automation, software development, testing, code generation, autocomplement, transformer.

Введение

В последние годы в разработке программного обеспечения (ПО) наблюдается тенденция на автоматизацию процессов. У этого есть различные причины. Наиболее важной из которых мы считаем комбинацию роста спроса на разработку программного обеспечения и существенный прогресс в области нейронных сетей (НС).

В условиях стремительного развития технологий и регулярных изменений требований к ПО классические способы тестирования становятся менее продуктивными. Беря во внима-

ние то, что автоматическое тестирование позволяет значительно ускорить процесс выявления ошибок, тем самым сократив время выхода программного продукта. Это также позволяет минимизировать вероятность человеческой ошибки. В связи с этим, применение ИС, как средство автоматизация процессов разработки ПО, становится важным инструментом для повышения производительности.

Кроме того, автоматизация способствует улучшению взаимодействия между командами разработки и тестирования. Интеграция ИС в процесс непрерывной интеграции (CI) и непрерывного развертывания (CD) позволяет обнаруживать ошибки на ранних этапах, что значительно снижает затраты на исправление дефектов и ускоряет вывод продукта на рынок.

При этом ИС могут также анализировать большие объемы данных, генерировать тестовые сценарии и предсказывать потенциальные сбои, что делает тестирование более эффективным и надежным. В связи с этим растет интерес к возможности полноценного использования возможностей искусственного интеллекта (ИИ) в разработке ПО.

На настоящий момент уже существуют нейронные сети способные генерировать фрагменты кода по сформулированному запросу. Одна из наиболее известных из них это OpenAI Codex.

В контексте тестирования и оптимизации ИС могут предсказывать потенциальные уязвимости в коде, в результате использование ИС позволит ускорить процесс разработки ПО, при этом высвобождая время разработчиков для участия на других этапах подготовки проекта.

Таким образом, использование нейронных сетей в автоматизации тестирования и разработки кода не только повышает эффективность процессов, но и улучшает качество конечного продукта, делая его более надежным и адаптивным к изменениям.

Нейронные сети и их применение в программировании

Нейронные сети являются вычислительными алгоритмами. Они предназначены для имитации поведения биологических систем, состоящих из «нейронов», и способны на машинное обучение, а также распознавание образов [2]. Они состоят из узлов (нейронов), организованных в слои: входной, скрытые и выходной. Каждый нейрон принимает входные данные, обрабатывает их с помощью весов и активационных функций, а затем передает результат следующему слою. Основной принцип работы ИС заключается в обучении на больших объемах данных. Этот процесс называется машинным обучением.

В процессе генерации кода чаще всего используются следующие типы нейронных сетей:

- 1) Рекуррентные нейронные сети (RNN);
- 2) Трансформеры;
- 3) Глубокие нейронные сети (DNN);
- 4) Генеративные модели.

При этом трансформеры и генеративные модели являются наиболее инновационными в данной сфере, так как во многом основаны на своих предшественниках, но при этом обладают большей скоростью работы.

В процессе разработки программного обеспечения ИС способны выполнять следующие задачи:

- 1) Автоматическая генерация и тестирование кода;
- 2) Обеспечение функций автодополнения;
- 3) Осуществление рефакторинга кода.

Рассмотрим каждую из указанных задач более подробно.

Автоматическая генерация кода — это процесс, при котором ИС, такие как OpenAI Codex, создают программный код на основе словесного описания, которое предоставляет разработчик. Этот процесс включает несколько ключевых аспектов:

1. Понимание естественного языка;
2. Поддержка языков программирования;

3. Генерация структурированных компонентов;
4. Улучшение и адаптация кода.

Это обусловлено тем, что современные поколения НС к настоящему моменту уже обрабатывали значительные объемы данных, включая примеры кода и текстовые описания. Это позволяет им обрабатывать запросы на естественном языке и преобразовывать их в код. Также НС, как ранее упомянутый Codex, поддерживают множество языков программирования, включая Python, JavaScript, Java, C#, и другие, что делает их использование достаточно универсальным и подходящим для большинства разработчиков, так как при запросе на создание кода можно указать конкретный язык.

Еще одним важным аспектом является то, что НС могут создавать не только простые функции, но и более сложные структуры, такие как классы, модули, API и даже целые приложения. Например, можно запросить создание RESTful API для управления данными о пользователях, и модель сгенерирует код для маршрутов, контроллеров и моделей.

Важно отметить тот факт, что НС способны запоминать ранее сформированные запросы и со временем адаптироваться к конкретной сфере применения. Это позволяет получить более связный и читаемый код. Более того, если в уже проекте были определены классы и функции, код, написанный нейронной сетью, будет обращаться к ним при необходимости.

Отдельного упоминания заслуживает сравнение традиционных методов разработки с ситуациями, в которых используются НС.

В ходе написания любых программ от разработчиков требуется: строгое соблюдение логики, ручное написание кода, с соблюдением принятых правил оформления, а также периодическая отладка как отдельных блоков программы, так и ее общей работоспособности. Причем данный процесс усложняется как по мере сложности разрабатываемого ПО, так и по мере увеличения числа разработчиков.

В отличие от этого, нейронные сети предлагают автоматизацию и, соответственно, значительно большую оптимизацию процесса написания кода. Также НС требуется меньшее количество времени на адаптацию к различным задачам за счет отсутствия необходимости понимания контекста.

Автоматизация тестирования с использованием нейронных сетей

Как упоминается в различных источниках [3, 4, 5], в процессе разработки программного обеспечения существенная часть времени уделяется тестированию. Автоматизация тестирования с использованием нейронных сетей представляет собой перспективное направление, которое может значительно улучшить качество и эффективность процесса тестирования программного обеспечения. Это возможно благодаря доступному функционалу НС:

- 1) Генерация тестов;
- 2) Анализ покрытия кода;
- 3) Обнаружение ошибок.

Резюмируя вышесказанное, можно получить следующую картину. Современные НС способны проанализировать структуру существующего кода и автоматически разработать тестовые ситуации для системы. Если же отдельные блоки программы уже протестированы, то будут сформированы тесты для покрытия непроверенных участков. В процессе анализа также будут выявлены наиболее уязвимые области программы. Кроме того, с течением времени НС будет продолжать обучаться в результате ей будет легче предсказывать потенциальные проблемы в новом коде.

Все это вместе поможет оптимизировать процесс тестирования и избежать пропуска критически важных участков кода, а также значительно сократить время на отладку и улучшить качество продукта.

Интеграция нейронных сетей в инструменты разработки

Существуют различные инструменты разработки ПО. Из них интегрированные среды разработки (IDE) выглядят наиболее перспективно для объединения с нейронными сетями. В

перспективе это может открыть новые возможности повышения эффективности и качества разработки программного обеспечения.

Интеграция НС в IDE может быть осуществлено по следующим основным направлениям:

- 1) Автодополнение кода;
- 2) Выявление ошибок;
- 3) Генерация документации.

Как указано выше, нейронные сети могут генерировать программный код в соответствии с запросом разработчика. В связи с этим, рациональным продолжением данной функции является улучшения функций автодополнения кода и создание более удобных подсказок. В частности, НС на основе трансформеров способны анализировать написанный начальный фрагмент кода и предлагать наиболее вероятные варианты его завершения.

Также, исходя из возможности нейронной сети понимать написанную программу до ее непосредственной компиляции на компьютере, важным фактором становится выявление ошибок на стадии написания кода.

Еще одним немаловажным аспектом интеграции НС может стать автоматическая генерация документации на основе кода.

Существуют примеры успешных интеграций и их влияние на производительность работы. Отдельно стоит отметить следующие из них: GitHub Copilot и DeepCode.

Первый инструмент основан на модели OpenAI Codex и интегрирован в популярные IDE, такие как Visual Studio Code. Он предоставляет разработчикам контекстуальные подсказки и автодополнения, что значительно ускоряет процесс написания кода и позволяет сосредоточиться на более сложных задачах.

Второй инструмент использует машинное обучение для анализа кода и выявления уязвимостей. Интеграция с системами CI/CD позволяет командам получать обратную связь о качестве кода на ранних этапах, что повышает общую безопасность и стабильность приложения.

Несмотря на очевидные преимущества использования этих инструментов, их использование сопряжено с рядом ограничений:

- 1) Высокая сложность настройки;
- 2) Зависимость от баз данных;
- 3) Потенциальное снижение производительности.

Эти факторы неизбежно возникают при соединении таких сложных систем как НС и инструменты разработки ПО. Причиной этого является прямая зависимость эффективности нейронных сетей от качества баз данных, на которых они были обучены. Следовательно, недостаток качественных данных может привести к неточным результатам. Также стоит учитывать тот факт, что НС могут требовать значительных вычислительных ресурсов, что может негативно сказаться на производительности IDE или CI/CD систем, особенно при работе с большими проектами.

Заключение

За последние несколько лет, нейронные сети претерпели значительное развитие и успешно встраиваются в различные сферы жизни, включая разработку программного обеспечения.

В частности, применение нейронных сетей открывает новые возможности в автоматизации как генерации кода, так и тестирования. Эти технологии не только сокращают время, необходимое для тестирования, но и позволяют выявлять ошибки на более ранних этапах разработки, что в конечном итоге приводит к более надежным и качественным продуктам.

За счет способности обрабатывать большие объемы данных современные НС, могут не только генерировать код, но и создавать тестовые сценарии, выявлять уязвимости и предсказывать потенциальные сбои, помогать оформлять документацию.

Интеграция нейронных сетей в инструменты разработки, такие как IDE, позволяет разработчикам сосредоточиться на более сложных задачах, минимизируя рутинную работу и снижая вероятность ошибок. Инструменты, такие как GitHub Copilot и DeepCode, уже демонстрируют значительное улучшение в процессах разработки и тестирования, обеспечивая более высокую скорость и надежность.

Однако, использование нейронных сетей не лишено существенных сложностей. Высокая сложность настройки, зависимость от качества данных и потенциальное снижение производительности требуют внимательного подхода к интеграции этих технологий. Вероятно, с учетом постоянного прогресса в области машинного обучения и искусственного интеллекта можно прогнозировать, что эти ограничения будут постепенно преодолеваются.

Таким образом, нейронные сети будут продолжать оказывать значительное влияние на сферу разработки программного обеспечения, открывая новые возможности для повышения качества выпускаемого продукта.

Библиографический список

1. Головкин, В.А. Интеграция искусственных нейронных сетей с базами знаний / В.А. Головкин, В.В. Голенков, В.П. Ивашенко, В.В. Таберко, Д.С. Иванюк, А.А. Крощенко, М.В. Ковалёв // *Онтология проектирования*. - 2018. - Т. 8, №3(29). - С.366-386. - DOI: 10.18287/2223-9537-2018-8-3-366-386.
2. Иванько А.Ф., Иванько М.А., Колесникова О.Д. Информационные нейронные сети // *Научное обозрение. Технические науки*. – 2019. – № 4. – С. 11-16
3. Косов Н.А., Мазепин П.С., Гришин Н.А. Применение нейронных сетей для автоматизации тестирования программного обеспечения // *Наукофера*. – 2020. – № 6. – С. 152-156
4. Полевщиков И.С., Файзрахманов Р.А. Автоматизированное управление тестированием программных систем с применением нейронных сетей // *Инженерный вестник Дона*. – 2018. – № 4.
5. Шевчук О.А. Тестирование производительности программного обеспечения // *International scientific review*. – 2024.

УДК 004.4'233, 004.89; ГРНТИ 28.23.37

СОЗДАНИЕ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА КОДА НА СООТВЕТСТВИЕ ТЕХНИЧЕСКОМУ ЗАДАНИЮ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

И.А. Кабанов, А.Н. Коробков

*Воронежский государственный университет инженерных технологий,
Российская Федерация, Воронеж*

Аннотация. В статье рассматривается разработка инструмента для автоматизированного анализа программного кода на соответствие требованиям технического задания (ТЗ) с применением методов машинного обучения. Цель исследования — повышение эффективности валидации ПО за счёт сокращения времени ручного тестирования и минимизации ошибок, связанных с человеческим фактором. Предложенный подход включает обработку текстовых требований ТЗ, преобразование их в структурированные метрики, а также обучение модели машинного обучения для сопоставления кода с заданными критериями.

Ключевые слова: интеллектуальный анализ кода, техническое задание (ТЗ), машинное обучение, автоматизация тестирования, валидация ПО, инструмент анализа кода, обработка требований, качество программного обеспечения.

Введение

Современные методологии разработки программного обеспечения сталкиваются с фундаментальной проблемой расхождений между требованиями, изложенными в техниче-

ском задании (ТЗ), и их фактической реализацией в исходном коде. Эти несоответствия приводят к значительным затратам на исправление дефектов, усложнению тестирования и снижению качества конечного программного продукта. В то время как традиционные методы контроля, включающие ручной аудит, статический анализ и формальные верификационные подходы, демонстрируют эффективность в обнаружении синтаксических ошибок и нарушений стиля кодирования, они оказываются недостаточными для выявления семантических отклонений, затрагивающих бизнес-логику программного обеспечения.

Использование методов интеллектуального анализа кода на основе машинного обучения открывает возможности для автоматизированного выявления таких несоответствий. Подход, основанный на обработке естественного языка (Natural Language Processing, NLP) в сочетании с анализом исходного кода, позволяет существенно повысить точность проверки соответствия требований их программной реализации. В рамках данного исследования рассматривается возможность создания прототипа инструмента, который интегрирует обработку текстовых требований, анализ программного кода и алгоритмы машинного обучения для обеспечения автоматизированного контроля качества программных решений. Такой инструмент способен повысить надежность программных продуктов, сократить временные и финансовые затраты на их разработку и тестирование, а также повысить уровень соответствия специфицированным требованиям.

Обзор существующих решений

На текущий момент методы анализа соответствия программного кода требованиям можно разделить на три основные категории.

Во-первых, существует класс инструментов статического анализа, таких как SonarQube, Checkmarx и PVS-Studio. Эти решения предназначены для автоматического обнаружения синтаксических ошибок, потенциальных уязвимостей и несоответствий стилю кодирования. Однако их возможности по проверке соответствия кода бизнес-логике, указанной в ТЗ, крайне ограничены. Например, SonarQube анализирует паттерны использования кода и выявляет потенциально дефектные конструкции, но не осуществляет сопоставление реализованных алгоритмов с ожидаемыми функциональными требованиями.

Во-вторых, существует категория инструментов для работы с текстовыми требованиями, включающая такие решения, как IBM Engineering Requirements Management DOORS и Jama Connect. Эти системы ориентированы на анализ текстовых спецификаций, извлечение ключевых сущностей и отслеживание изменений в требованиях, но они не интегрированы с механизмами анализа исходного кода. Следовательно, данные решения не позволяют осуществлять автоматизированную проверку того, насколько реализованный код соответствует изначальным спецификациям.

В-третьих, активно развиваются решения на основе машинного обучения, включая CodeBERT, GraphCodeBERT и GPT-Code. Эти модели применяются для автоматической классификации программного кода, генерации комментариев и поиска дублирующихся фрагментов, но они не адаптированы для решения задачи сопоставления кода с текстовыми формулировками требований.

Основными недостатками существующих решений являются фрагментарность подходов, отсутствие комплексного инструмента, объединяющего анализ ТЗ и кода, недостаток специализированных размеченных данных для обучения моделей, сложность интерпретации результатов и низкая степень интеграции методов контроля качества.

Методология

Разрабатываемый инструмент строится на сочетании методов обработки естественного языка, анализа абстрактного синтаксического дерева (AST) и алгоритмов машинного обучения. Анализ выполняется поэтапно.

На первом этапе осуществляется извлечение и обработка текстовых требований, представленных в формате PDF или DOCX, с использованием библиотек PyPDF2 и python-docx.

После этого текст проходит токенизацию, лемматизацию и векторизацию с помощью NLP-моделей, таких как BERT, что позволяет выделить ключевые смысловые компоненты требований.

На втором этапе анализируется исходный код, который подвергается парсингу с использованием библиотеки `tree-sitter`. Это позволяет представить код в виде абстрактного синтаксического дерева, выделяя его основные элементы: функции, классы, переменные, логические конструкции и вызовы API.

Финальный этап заключается в семантическом сопоставлении требований и программного кода. Для этого применяются алгоритмы машинного обучения, включая XGBoost и нейросетевые архитектуры PyTorch. Сопоставление осуществляется посредством анализа векторных представлений, что позволяет оценить степень соответствия функционала программного обеспечения исходным требованиям.

Архитектура прототипа

Архитектура разрабатываемого инструмента строится на основе модульного подхода, обеспечивающего гибкость, масштабируемость и адаптивность к различным сценариям использования. Каждый из модулей выполняет специализированные задачи, но при этом они тесно взаимодействуют друг с другом, формируя целостную систему анализа.

Первый модуль отвечает за обработку текстовых требований. В его основе лежит использование библиотек PyPDF2, `python-docx`, а также современных NLP-моделей, таких как `sparse` и `transformers`. Этот модуль выполняет ряд критически важных функций, включая токенизацию, лемматизацию, выделение ключевых сущностей и разбиение текста на логические сегменты. Дальнейшая обработка включает векторизацию данных с применением методов Word2Vec или BERT, что позволяет подготовить требования к их последующему сопоставлению с кодом. Особое внимание уделяется нормализации терминологии и устранению неоднозначностей, что критично для корректного анализа соответствия.

Второй модуль отвечает за анализ исходного кода и его структурное представление. Он основан на механизмах разбора абстрактного синтаксического дерева (AST) с использованием `tree-sitter` и встроенной библиотеки Python `ast`. В процессе обработки происходит извлечение и классификация структурных элементов кода, включая функции, классы, условные конструкции, вызовы API и потоки управления. Для обеспечения семантической целостности анализа применяется статический анализ зависимостей, позволяющий выявить связи между различными компонентами программного обеспечения. Также реализована поддержка многозначных языковых конструкций, таких как декораторы и метаклассы в Python, что расширяет область применимости инструмента.

Третий модуль включает в себя алгоритмы машинного обучения и отвечает за семантическое сопоставление кода с требованиями. Он базируется на ансамблевых методах (XGBoost, Random Forest) и глубоких нейросетевых моделях (PyTorch, TensorFlow), которые позволяют анализировать соответствие программных решений заданным спецификациям. Важной особенностью является использование предварительно обученных моделей, оптимизированных для обработки как естественного языка, так и программного кода. Для повышения точности анализа применяется механизм дообучения моделей на доменных данных, что позволяет учитывать специфические аспекты различных предметных областей.

Четвертый модуль предназначен для визуализации результатов анализа и формирования отчетности. Интеграция с MetaBase позволяет представлять данные в виде интерактивных графиков, диаграмм и таблиц, что облегчает интерпретацию результатов. Дополнительно предусмотрена возможность экспорта отчетов в формате PDF, с использованием LaTeX и Markdown для обеспечения высокого качества представления данных. Гибкость конфигурирования отчетов позволяет пользователям адаптировать их структуру в зависимости от специфических требований.

Центральное место в архитектуре занимает интеграционная среда, которая обеспечивает эффективное взаимодействие между всеми модулями. В её основе лежит система управ-

ления очередями сообщений (например, Apache Kafka или RabbitMQ), которая позволяет масштабировать обработку данных и синхронизировать выполнение задач. Также предусмотрена возможность интеграции с внешними инструментами анализа кода, такими как SonarQube, для расширения функциональности системы.

Таким образом, модульная архитектура инструмента обеспечивает его высокую степень адаптивности, расширяемости и применимости в широком спектре задач, связанных с автоматизированным контролем качества программного обеспечения.

Эксперименты и результаты

Для валидации разработанного инструмента был использован размеченный датасет, содержащий пары "требование-код". В ходе экспериментов было выявлено значительное повышение точности анализа по сравнению с методами, основанными на поиске ключевых слов. Модель продемонстрировала низкий уровень ложных срабатываний и высокую способность различать релевантные и нерелевантные фрагменты кода. Например, при проверке модуля регистрации пользователей инструмент выявил отсутствие механизма проверки сложности пароля, предусмотренного ТЗ, тогда как статические анализаторы, такие как SonarQube, рассматривали лишь длину переменной.

Дополнительные тестирования на различных программных проектах подтвердили универсальность метода, его устойчивость к вариативности формулировок требований и различным стилям программирования. Применение fine-tuning на специализированных наборах данных позволило повысить точность классификации и снизить количество ошибок при анализе сложных бизнес-логик.

Потенциальная аудитория

Целевая аудитория данного инструмента включает несколько категорий пользователей. В первую очередь, это разработчики программного обеспечения, которые могут использовать инструмент для автоматической проверки соответствия кода требованиям и предотвращения ошибок на ранних этапах разработки. Во-вторых, тестировщики и инженеры по обеспечению качества смогут применять данный инструмент для автоматизированного анализа соответствия программных модулей заявленным требованиям. Также инструмент может быть полезен для технических руководителей и менеджеров проектов, которым важно оперативно оценивать качество реализации требований. Наконец, академические исследователи и студенты, изучающие программную инженерию и машинное обучение, могут использовать данный инструмент в образовательных и исследовательских целях.

Заключение

Разработанный прототип подтвердил возможность автоматизации процесса проверки соответствия кода требованиям ТЗ с применением машинного обучения. Основными ограничениями остаются зависимость от качества обучающих данных и необходимость дополнительного обучения модели для учета специфики различных проектов. Исследование показало, что для повышения точности анализа необходимо увеличение объема обучающих данных, а также внедрение методов Explainable AI (XAI) для повышения интерпретируемости решений модели.

Библиографический список

Девлин Дж., Чанг М.-В., Ли К., Toutanova К. BERT: Предварительное обучение двунаправленных трансформеров для понимания естественного языка // arXiv. — 2018. — URL: <https://arxiv.org/abs/1810.04805> (дата обращения: 18.02.2025).

Кампбелл А., Папапетру П. SonarQube на практике. — 1-е изд. — Шелтер-Айленд, Нью-Йорк: Manning Publications, 2014. — 325 с.

PyTorch [Электронный ресурс] // Официальный сайт. — URL: <https://pytorch.org> (дата обращения: 10.10.2023).

Tree-sitter [Электронный ресурс] // GitHub. — URL: <https://github.com/tree-sitter/tree-sitter> (дата обращения: 16.02.2025).

Хоннибал М., Монтани И. spaCy: Промышленные решения для обработки естественного языка на Python. — 2017. — URL: <https://spacy.io> (дата обращения: 10.10.2023).

Чэнь Т., Гестрин К. XGBoost: Масштабируемая система повышающего дерева // Труды 22-й Международной конференции ACM SIGKDD по обнаружению знаний и анализу данных. — Нью-Йорк, США: ACM, 2016. — С. 785–794. — 10 с.

Чжан Ц., Хань С., Лю Ц., Цзян С., Сунь М., Лю Ц. CodeBERT: Предварительно обученная модель для программирования и естественных языков // arXiv. — 2020. — URL: <https://arxiv.org/abs/2002.08155> (дата обращения: 15.02.2025).

УДК 615.47; ГРНТИ 20.53

РАЗРАБОТКА НЕЙРОСЕТЕВЫХ СТРУКТУР ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ «ЧАСТОТА – КОД» ДВУХ ПЕРЕМЕННЫХ И ИХ ОБУЧЕНИЕ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА «ДЕЛЬТА – ПРАВИЛО»

Д.Ю. Демин, С.В. Челебаев

*Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина,
Российская Федерация, Рязань, demind390@gmail.com*

Аннотация. В работе представлены нейросетевые структуры преобразователя «частота – код» для воспроизведения функциональных зависимостей двух переменных. Эти структуры предназначены для обучения на основе алгоритма «дельта – правило». Рассмотрены три архитектуры нейронных сетей, различающихся организацией слоёв, методами взвешивания входных данных и комбинацией сигналов. Рассмотрены вопросы, связанные с обучением нейросетевых структур преобразователей на основе модификации алгоритма дельта-правила.

Ключевые слова: нейронная сеть, преобразователь, частота, код, обучение, функция двух переменных.

DEVELOPMENT OF NEURAL NETWORK STRUCTURES OF THE FREQUENCY-CODE CONVERTER OF TWO VARIABLES AND THEIR TRAINING BASED ON THE DELTA-RULE ALGORITHM

D.Yu. Demin, S.V. Chelebaev

*Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin,
Russia, Ryazan, demind390@gmail.com*

The summary. The paper presents neural network structures of the frequency-code converter for reproducing the functional dependencies of two variables. These structures are designed for delta-rule learning. Three neural network architectures are considered, differing in the organization of layers, methods of weighing input data and a combination of signals. Issues related to training of neural network structures of converters based on modification of delta-rule algorithm are considered.

Keywords: neural network, converter, frequency, code, learning, function of two variables.

При разработке измерительных систем, имеющих в своем составе датчики аналоговых сигналов, в которых носителями первичной информации выступают параметры, заданные в форме частоты, длительности, фазы, амплитуды, необходимо выполнить операции преобразования аналоговых сигналов в их цифровой эквивалент (код).

Перспективными разработками являются преобразователи, совмещающие функции преобразования и нелинейной математической переработки входных аналоговых сигналов, например их функционального преобразования.

С необходимостью воспроизведения функций двух и большего числа переменных обычно сталкиваются при решении баллистических и навигационных задач, задач контроля и управления движущимися объектами и различными технологическими процессами, а также задач, связанных с исследованием и моделированием сложных систем авторегулирования.

Перспективным направлением воспроизведения функциональных зависимостей является применение математического аппарата искусственных нейронных сетей [1]. Это позволяет получить описание структуры преобразователя, отличающегося высокой однородностью составляющих его нейроэлементов и технологической простотой реализации сети на цифровой элементной базе, например, на программируемых логических интегральных схемах, например, на ПЛИС.

На сегодняшний день детально проработаны вопросы, связанные с проектированием преобразователей, построенных на основе применения нейронных сетей, обучаемых с помощью алгоритма обратного распространения ошибки. Однако вопросы, связанные с возможностью обучения сети преобразователя двух переменных на основе применения алгоритма дельта – правила, детально не проработаны [2].

Разработка структур нейросетевого преобразователя

Далее предлагаются варианты структур нейросетевого преобразователя частоты в код с одним слоем обучаемых весов, ориентированные на воспроизведение функциональных зависимостей двух переменных.

Вариант 1. Выберем упрощенную 2-слойную структуру персептронной сети следующего вида: нулевой слой осуществляет операцию преобразования «аналог – цифра», первый слой использует сигмоидную функцию активации, а второй слой осуществляет сложение выходных значений первого слоя (рисунок 1).

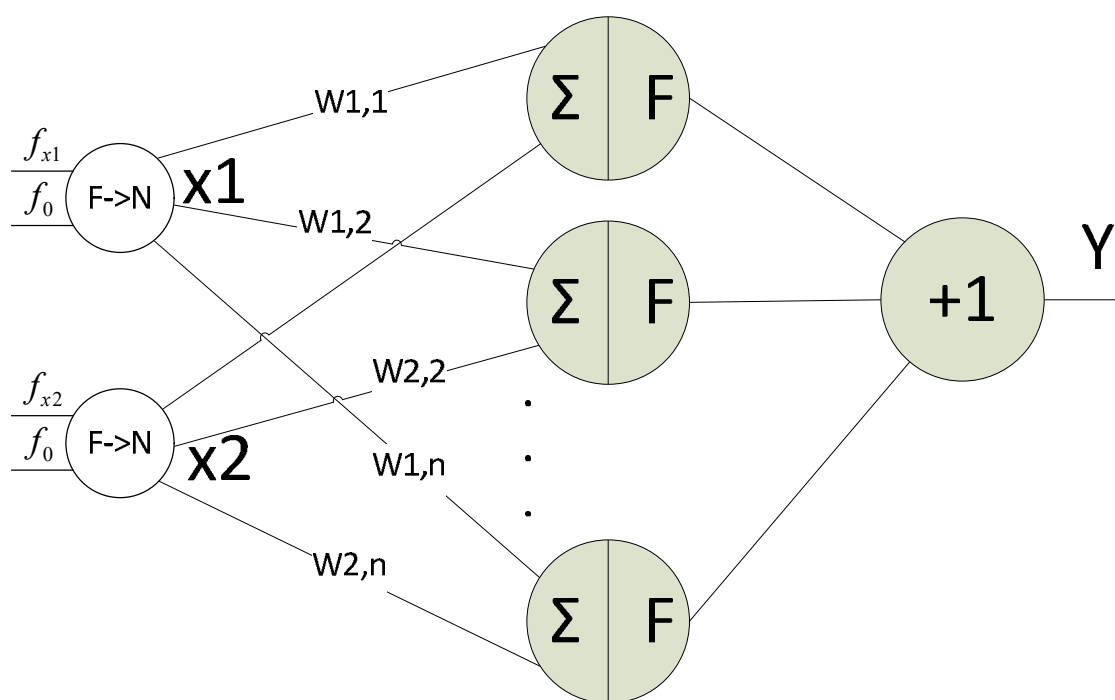


Рис. 1. Вариант № 1 структуры нейросетевого преобразователя частоты в код двух переменных

Таким образом, нейронная сеть (см. рисунок 1) имеет следующие особенности:

- 1) на нулевой (входной) слой подаются аргументы функции x_1 и x_2 ;
- 2) все весовые коэффициенты для второго слоя имеют значение “1”;
- 3) первый (входной) слой принимает значения со входов сети, и обладает матрицей весовых коэффициентов $w_{i,1}$. Эти веса подлежат обучению.

Такую сеть можно обучать алгоритмами обучения однослойных сетей.

Функционирование аппроксиматора описывается выражением:

$$y = \sum_{i=1}^n F^{(1)} \left(\sum_{j=1}^n w_{i,1} x_j \right),$$

где y – значение выхода нейронной сети;

$w_{i,1}$ – весовой коэффициент 1-го слоя нейронной сети;

$F^{(1)}$ – функция активации нейронов 1-го слоя.

В качестве функции активации нейросетевой структуры была выбрана логистическая функция с двумя параметрами:

$$F = \frac{1}{1 + e^{-\frac{S_i - a_i}{b}}}, \quad (1)$$

где a_i – аддитивный параметр активационной функции;

b – мультипликативный параметр;

S – взвешенная сумма входных сигналов нейрона.

Вариант 2. Нулевой слой осуществляет операцию преобразования «аналог – цифра», первый слой осуществляет сложение входов, а второй слой использует сигмоидную функцию активации для значений первого слоя (рис. 2).

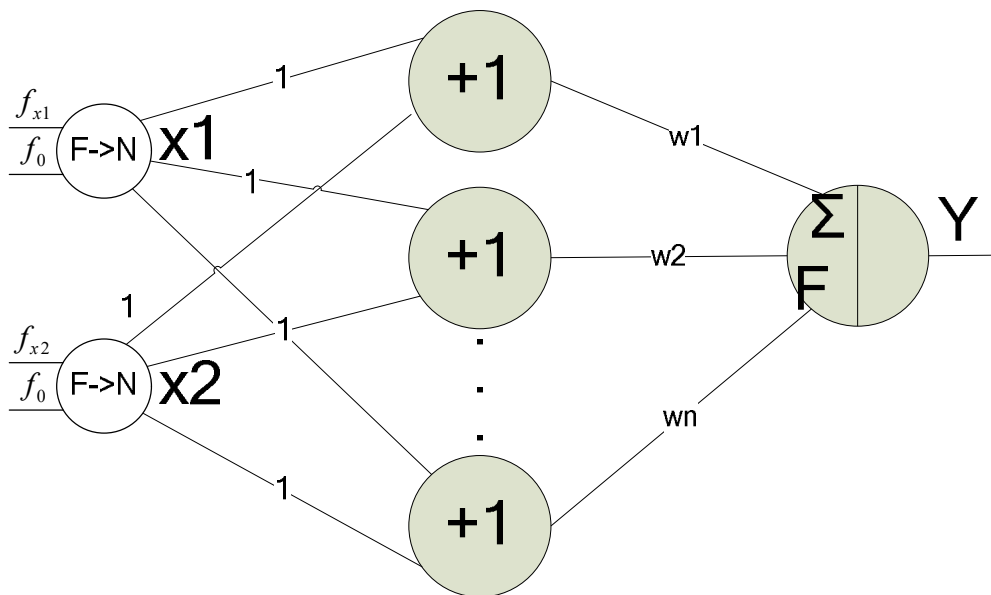


Рис. 2. Вариант № 2 структуры преобразователя частоты в код двух переменных

Функционирование сети (см. рисунок 2) описывается выражением:

$$y = \sum_{i=1}^n w_{i,1} F^{(2)} \left(\sum_{j=1}^n x_j \right),$$

где $F^{(2)}$ – функция активации нейронов вида (1).

Вариант 3. Нулевой слой осуществляет операцию преобразования «аналог – цифра» и разделяет входные переменные x_1 и x_2 на независимые ветви обработки. Первый слой каждой ветви использует сигмоидную функцию активации с обучаемыми весовыми коэффициентами, а второй слой суммирует выходы обеих ветвей (рисунок 3).

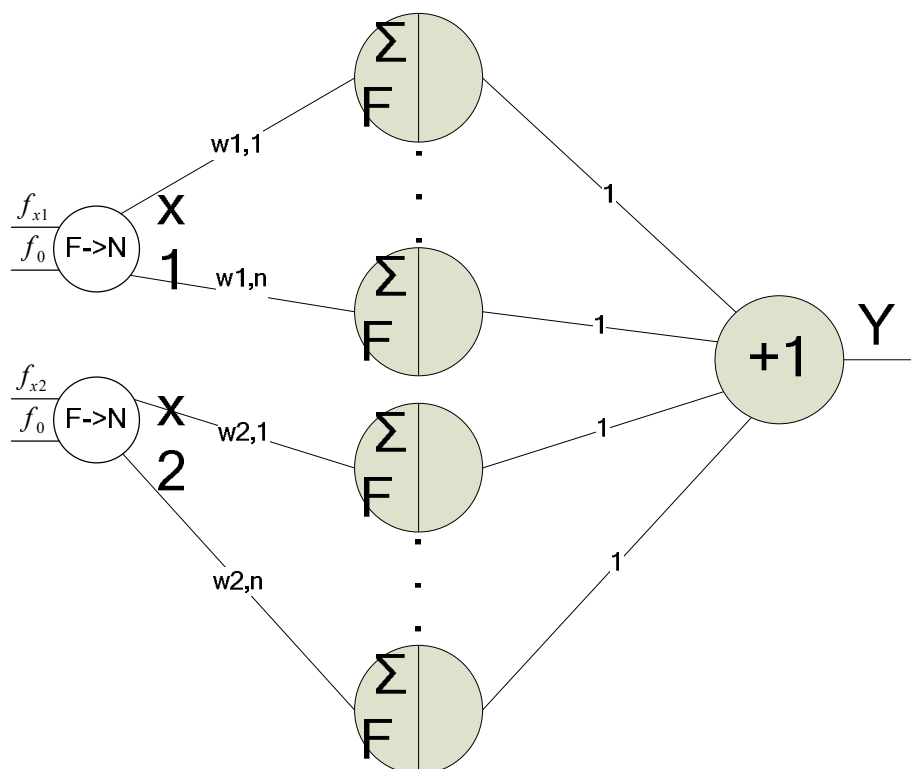


Рис. 3. Вариант № 3 структуры преобразователя частоты в код двух переменных

Функционирование такой сети описывается выражением:

$$y = \sum_{i=1}^n \left(F^{(1)} \left(\sum_{j=1}^n w_{1,j} x_1 \right) + F^{(1)} \left(\sum_{j=n+1}^{2n} w_{2,j} x_2 \right) \right),$$

где $F^{(1)}$ – функция активации нейронов вида (1).

Обучение нейросетевого преобразователя

Нейросетевые структуры, представленные на рисунках 1 – 3, могут быть обучены на основе дельта-правила [3, 4]. Величина δ равна разности между требуемым или целевым выходом T и реальным выходом Y :

$$\delta = T - Y.$$

Коррекция весов осуществляется по формулам:

$$\begin{aligned} \Delta_i &= \eta \delta x_i, \\ w(n+1) &= w(n) + \Delta_i, \end{aligned}$$

где Δ_i – коррекция, связанная с i -м входом x_i ;
 $w_i(n+1)$ – значение веса i после коррекции;
 $w_i(n)$ – значение веса i до коррекции;
 η – скорость обучения сети.

Предлагаемой особенностью коррекции является модификация только одного веса нейрона, соответствующего одному диапазону изменения преобразуемой аналоговой переменной x_1 или x_2 , как это показано в следующем фрагменте программы на языке C# (для случая использования 4 нейронов):

```

if ( $x1[k] < (x1max - x1min) * 1 / m + x1min$ )
     $w[0][0] += speed * delta * x1[k];$ 
else if ( $x1[k] < (x1max - x1min) * 2 / m + x1min$ )
     $w[0][1] += speed * delta * x1[k];$ 
else if ( $x1[k] < (x1max - x1min) * 3 / m + x1min$ )
     $w[0][2] += speed * delta * x1[k];$ 
else if ( $x1[k] < (x1max - x1min) * 4 / m + x1min$ )
     $w[0][3] += speed * delta * x1[k];$ 
if ( $x2[k] < (x2max - x2min) * 1 / m + x2min$ )
     $w[1][0] += speed * delta * x2[k];$ 
else if ( $x2[k] < (x2max - x2min) * 2 / m + x2min$ )
     $w[1][1] += speed * delta * x2[k];$ 
else if ( $x2[k] < (x2max - x2min) * 3 / m + x2min$ )
     $w[1][2] += speed * delta * x2[k];$ 
else if ( $x2[k] < (x2max - x2min) * 4 / m + x2min$ )
     $w[1][3] += speed * delta * x2[k];$ 

```

В приведенном фрагменте использованы обозначения:

$x1max$ и $x2max$ – максимальные значения преобразуемых величин;

$x1min$ и $x2min$ – минимальные значения преобразуемых величин;

$speed$ – скорость обучения нейронной сети;

m – количество нейронов 1-го слоя сети.

Полученные результаты сравнивались с результатами степенной аппроксимации. Подтверждено преимущество используемого метода нейросетевой аппроксимации.

Библиографический список

1. Локтюхин В.Н., Челебаев С.В. Принципы применения технологии искусственных нейронных сетей для проектирования преобразователей частотно-временных параметров сигналов в код // Датчики и системы. – 2006. – № 2. – С. 43–56.
2. Челебаева Ю.А., Челебаев С.В. Преобразователи частотно-временных параметров биосигналов в код на основе нейросети с одним слоем обучаемых весовых коэффициентов // Биомедицинская радиоэлектроника. 2023. Том 3. № 3. С. 90-98.
3. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. – Санкт-Петербург: Вильямс, 2016. 768 с.
4. Горбань А.Н., Россиев Д.А. Нейронные сети в обработке сигналов и управлении. – Новосибирск: Наука, 2019. 560 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИЯ О VIII МЕЖДУНАРОДНОМ ФОРУМЕ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ» СТНО-2025»	3
МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ»	6
Секция «МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И МОДЕЛИ В НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ И ПРАКТИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМАХ»	6
Бухенский К.В., Дюбуа А.Б., Конюхов А.Н. Модель нечеткой регрессии на основе чисел LR-типа с нечеткими спрэдами.....	6
Зиастин А.Р., Мосин С.Г. Выделение характерных параметров ЭКГ-сигнала для диагностики заболеваний сердечно-сосудистой системы методами ИИ.....	10
Нелюхин С.А. Исследование на устойчивость нейронной сети с обратной связью методом Ляпунова.....	15
Городничева Е.В., Сосулин Ю.А. Методы планирования эксперимента при исследовании объектов с ограничениями.....	22
Чернов В.Г. Принятие решений на основе композиции нечетких отображений.....	26
Лискина Е.Ю., Силантьева И.А. Состояния равновесия четырехфакторной динамической модели рынка труда с производственной функцией Кобба–Дугласа.....	30
Купцов И.М., Абрамов В.В. К проблеме поведения решений системы обыкновенных дифференциальных уравнений в окрестности бесконечности фазового пространства.....	35
Юдин Д.В., Абрамов В.В. К проблеме исследования односекторной экономики.....	39
Абрамов В.В. Об устойчивости нулевого решения одной разностной системы.....	44
Иванов А.И., Коненков Н.В. Влияние асимметричного прямоугольного импульса на квадрупольный фильтр масс с цилиндрическими электродами.....	48
Ципоркова К.А., Лукьянова Г.С. Метод ортогональных разложений в задаче оценивания при полимультипликативной модели измерения.....	54
Афонин Д.О., Барышев Г.А., Вендин А.С., Малюков Д.И., Чесных И.А., Ципоркова К.А. Применение математического аппарата функций многих переменных для исследования рельефа местности.....	58
Кружалов А.С. Радиомическая модель для выявления ложноположительных находок при распознавании церебральных аневризм.....	63
Костиков М.Г. Применение методов математического моделирования при внедрении информационной системы расчета стоимости коммунальных услуг.....	68
Львова Т.Л., Миронов В.В. Программа работ по анализу устойчивости линейных систем дифференциальных уравнений с квазипериодическими и мультипериодическими коэффициентами на основе метода Понтрягина.....	73
Свиридов П.С. Поглощение и рассеяние низкочастотных электромагнитных волн черными дырами.....	76

Есенкина А.С., Заика А.И., Лобов А.А., Никифорова А.В., Миронов Вал.В. Компьютерный анализ устойчивости решения системы Ла-Салля.....	81
Миронов Вал.В. Математические модели интеллекта, аксиоматизация, алгебра и парадокс искусственного интеллекта, перспективы развития интеллекта.....	91
Секция «ОБРАБОТКА ДАННЫХ, ИЗОБРАЖЕНИЙ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ».....	112
Клочко В.К. Алгоритм обнаружения нескольких сигналов в системе передачи данных.....	112
Жабин В.С., Муртазов А.К. Параметры камер для фотометрических измерений в метеорной астрономии.....	117
Корчагин В.Д. Качество обучения искусственных нейронных сетей для обработки радиографических изображений.....	125
Чинь В.Т. Комбинирование пространственной и частотной фильтрации для подавления спекл-шума изображений.....	131
Бабаян П.В., Жгутова Е.С. Алгоритм оценки точности совмещения изображений при билинейном преобразовании.....	136
Мудров Е.П., Левитин А.В. Обнаружение клубней картофеля на фоне грунта.....	142
Бабаян П.В., Буянкина Я.А. Пороговые методы выделения объекта интереса на изображении на основе методов Отцу, Капура и Тсаллиса.....	147
Умуркулов Ж.Ж. Установка для исследования температурной зависимости диэлектрической проницаемости сегнетоэлектриков.....	152
Корчагина С.С., Майка А.Н. Удаленный мониторинг физиологических и эмоциональных состояний человека на основе мультимодального анализа видеоданных.....	155
Кузнецов В.П. Рекуррентная нейронная сеть с комбинированным обучением.....	160
Жгутов П.Е. Применение автоэнкодеров для восстановления искаженных изображений..	167
Звездочкин М.Ю. Модель искажений цифрового сигнала, применимая для систем обработки потоковой видеoinформации.....	174
Ерохин В.Ю. Вторичная обработка сигналов с быстроменяющимися параметрами: задачи перспективных исследований.....	178
Секция «ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ».....	181
Гущина Е.А., Бурковский В.Л. Реализация метода k-средних в задаче классификации объектов потребительской среды в неопределённых условиях.....	181
Карасев В.В., Михеев А.А. Исследование особенностей реакции индуктивно связанных контуров на два разнополярных прямоугольных импульса различной длительности.....	185
Нетесов Г.А., Бурковский В.Л. Структура программного комплекса анализа и прогнозирования рисков отказов в распределенных системах управления.....	190
Руднев Ю.А., Шорина К.В., Эйнуллаев Т.А. Разработка системы автоматизированной генерации тестовых заданий на основе учебных материалов с применением технологий искусственного интеллекта в образовательной сфере.....	194

Юркова В.И., Маркин А.В. Разработка системы анализа платежной дисциплины абонентов предприятий ЖКХ.....	199
Гладких Т.В., Коробова Л.А. Разработка образовательной платформы для обучения сотрудников IT-предприятия.....	205
Вышегородцев К.В. Визуализация академической успеваемости: разработка интерактивного модуля для системы «электронная кафедра». анализ и мониторинг результатов обучения.....	213
Репин И.С. Обработка сигнала ЭКГ при помощи языка функционального программирования HASKELL.....	218
Сударев А.В., Ковшов Е.Е. Моделирование бизнес-процессов и структур данных для работы с результатами радиационного неразрушающего контроля.....	201
Молчанова А.А. Симуляция движения жидкости в капилляре с использованием технологии виртуальной реальности.....	228
Верещагина О.Д., Тютюнджи Е.Ю. Искусственный интеллект в здравоохранении: роль машинного обучения в оценке безопасности лекарств и предотвращении нежелательных реакций.....	234
Булатицкий Д.И., Грудина Н.А. Проектирование подсистемы уведомлений и подсистемы задач для программного комплекса РискПроф.....	242
Фадеев Р. Н. Автоматизированная система управления процессом компримирования водорода.....	248
Исаев Р.А., Курочкина А.И. Особенности модели данных многопользовательского сервиса поддержки когнитивного моделирования.....	252
Кочетков А.В. Использование нейросетевых технологий в обработке научно-технической информации.....	256
Кресникова А.А., Витязева Т.А. Программное средство обработки электрокардиосигнала и сигнала дыхания.....	260
Бурмистров А.С., Белов В.В. Мультиагентная система оценивания групповых проектов в рамках международных образовательных программ (на примере ERASMUS+).....	265
Федулов М.А., Белов В.В. Разработка программного обеспечения с использованием нейронных сетей.....	268
Кабанов И.А., Коробков А.Н. Создание инструмента для интеллектуального анализа кода на соответствие техническому заданию с использованием методов машинного обучения..	272
Демин Д.Ю., Челебаев С.В. Разработка нейросетевых структур преобразователя «Частота – код» двух переменных и их обучение на основе алгоритма «Дельта – правило»	276

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ

Научное издание

В 10 томах

Том 5

Под общей редакцией О.В. Миловзорова.

Подписано в печать 15.06.25. Формат 60x84 1/8.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

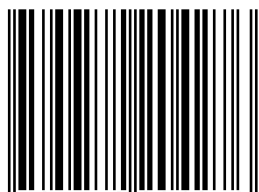
Гарнитура «Times New Roman».

Усл. печ. л..

Тираж 100 экз. Заказ №.

Рязанский государственный радиотехнический университет,
Редакционно-издательский центр РГРТУ,
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

ISBN 978-5-7722-0427-6



9 785772 204276 >