

ISSN 2663-4228 (Print)
ISSN 2663-4236 (Online)

Вестник Донецкого национального университета



НАУЧНЫЙ
ЖУРНАЛ

*Основан в 1997 году,
«Серия Г: Технические науки»
основана в 2018 году*

Серия Г:
Технические
науки

2/2025

Редакционная коллегия журнала
«Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки»

Главный редактор – д-р техн. наук, проф. **В.В. Данилов**.

Зам. главного редактора – канд. техн. наук, доц. **И.А. Третьяков**.

Ответственный секретарь – канд. техн. наук **Е.Д. Пометун**.

Члены редколлегии: д-р техн. наук, проф. **Г.В. Аверин**; д-р техн. наук, проф. **Л.В. Алексейчик**; канд. физ.-мат. наук, с.н.с. **П.В. Асланов**; канд. техн. наук, доц. **Т.С. Башевая**; д-р техн. наук, доц. **И.А. Бершадский**; д-р техн. наук, проф. **А.Б. Бирюков**; д-р техн. наук, проф. **С.В. Борщевский**; д-р техн. наук, доц. **К.А. Выговтов**; д-р техн. наук, проф. **С.А. Горожанкин**; канд. техн. наук, доц. **С.В. Гридин**; канд. техн. наук, доц. **Т.В. Ермоленко**; канд. техн. наук, доц. **Т.В. Завадская**; д-р техн. наук, доц. **А.В. Звягинцева**; д-р техн. наук, доц. **С.А. Зори**; д-р техн. наук, доц. **В.В. Карнаух**; канд. техн. наук, с.н.с. **А.А. Курушин**; канд. техн. наук, доц. **И.А. Молоковский**; д-р техн. наук, проф. **Н.Г. Насонкина**; канд. техн. наук, доц. **В.В. Паслѐн**; д-р техн. наук, проф. **А.С. Петров**; д-р хим. наук, проф. **А.И. Сердюк**; академик РАН, д-р техн. наук, проф. **И.А. Соколов**; канд. физ.-мат. наук, доц. **В.И. Тимченко**; д-р техн. наук, проф. **В.К. Толстых**; д-р техн. наук, проф. **М.Н. Чепцов**; д-р техн. наук, доц. **Д.В. Шевцов**; канд. техн. наук, доц. **О.Г. Шелехова**.

The Editorial Board of the journal
«Bulletin of Donetsk National University. Series G: Technical Sciences»

The Editor-in-Chief – Dr. of tech., prof. **V.V. Danilov**.

The Deputy of the Editor-in-Chief – Cand. of tech., doc. **I.A. Tretiakov**.

Assistant Editor – Cand. of tech. **E.D. Pometun**.

The Members of the Editorial Board: Dr. of tech., prof. **G.V. Averin**; Dr. of tech., prof. **L.V. Alekseychik**; Cand. of phys. and math., s. researcher **P.V. Aslanov**; Cand. of tech., doc. **T.S. Bashevaia**; Dr. of tech., doc. **I.A. Bershadskii**; Dr. of tech., prof. **A.B. Biriukov**; Dr. of tech., prof. **S.V. Borshchevskii**; Dr. of tech., doc. **K.A. Vytovtov**; Dr. of tech., prof. **S.A. Gorozhankin**; Cand. of tech., doc. **S.V. Gridin**; Cand. of tech., doc. **T.V. Ermolenko**; Cand. of tech., doc. **T.V. Zavadskaia**; Dr. of tech., doc. **A.V. Zviagintseva**; Dr. of tech., doc. **S.A. Zori**; Dr. of tech., doc. **V.V. Karnaukh**; Cand. of tech., s. researcher **A.A. Kurushin**; Cand. of tech., doc. **I.A. Molokovskii**; Dr. of tech., prof. **N.G. Nasonkina**; Cand. of tech., doc. **V.V. Paslen**; Dr. of tech., prof. **A.S. Petrov**; Dr. of chem., prof. **A.I. Serdiuk**; RAS Academician, Dr. of tech., prof. **I.A. Sokolov**; Cand. of phys. and math., doc. **V.I. Timchenko**; Dr. of tech., prof. **V.K. Tolstykh**; Dr. of tech., prof. **M.N. Sheptsov**; Dr. of tech., doc. **D.V. Shevtsov**; Cand. of tech., doc. **O.G. Shelekhova**.

Адрес редакции: 283001, Российская Федерация, Донецкая Народная Республика, г. Донецк, пр. Театральный, д. 13.

Тел.: +7 (856) 302 07 81

E-mail: vestnik.g@mail.ru

URL: <http://donnu.ru/vestnikG>

С 12.02.2024 г. журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (**Перечень ВАК РФ**) (категория **K2** с 13.12.2024 г.) по следующим научным специальностям и соответствующей им отрасли (технические науки):

- 2.2.9. Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры,
- 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы,
- 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения,
- 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций,
- 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика,
- 2.3.2. Вычислительные системы и их элементы,
- 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами,
- 2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей,
- 2.3.8. Информатика и информационные процессы,
- 2.4.1. Теоретическая и прикладная электротехника,
- 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы,
- 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника.

Журнал включен в национальную информационно-аналитическую систему **РИНЦ** (Лицензионный договор № 378-06/2016 от 24.06.2016 г. в ред. от 27.03.2019 г.): http://elibrary.ru/title_about_new.asp?id=69984

Журнал включен в международную индексационную наукометрическую базу **Index Copernicus International Journals Master List**: <http://journals.indexcopernicus.com/search/details?id=63327>

*Печатается по решению Ученого совета ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»:
Протокол №4 от 17.04.2025 г.*

Вестник Донецкого национального университета

Серия Г: Технические науки

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ОСНОВАН В 1997 ГОДУ,
СЕРИЯ Г ОСНОВАНА В 2018 ГОДУ

Номер посвящён 60-летию со дня
основания Физико-технического
факультета

№ 2/2025

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

- Коптев Г.И., Торуна Е.М.* Транзисторные однокольцевые RC-автогенераторы с фильтром низких частот 5
- Савотченко С.Е., Акапьев В.Л.* Моделирование газоанализаторной системы лазерного детектирования утечек метана с использованием мини беспилотных летательных аппаратов 19
- Пометун Е.Д.* Исследование выбросов от точечных источников с помощью термоанемометра 30

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

- Бондаренко В.И., Федоров М.Д.* Исследование методов глубокого обучения для распознавания рукописного текста 37
- Нестругина Е.С., Ганин Р.Ю.* Использование методов глубокого обучения и компьютерного зрения для автоматического выделения гольф-ударов на видео 47
- Салтанаева Е.А., Куценко С.М.* Применение методов распознавания образов при анализе состояния водителя для оценки степени усталости с использованием нейро-сетевых технологий 54
- Зверев Г.И., Ефимов А.О.* Автоматизация обработки информации о выявлении уязвимостей программного обеспечения в целях решения задач управления и принятия решений 61
- Куижева С.К., Довгаль В.А.* Анализ протоколов связи для автономных беспилотных летательных аппаратов, выполняющих совместный полет 76
- Грачев М.И.* Математическая модель динамики состояний системы функционирования ВУЗа в условиях автоматизации 85
- Третьяков И.А., Куликова А.С., Долбеценкова Н.В., Ступак В.А.* Компоненты автоматизированной системы научных исследований радиоканалов ПЭМИН 94
- Несова А.В., Колесенков А.Н.* Комбинированный метод сегментации изображений на основе алгоритмов SLIC и Random Forest для мониторинга лесных массивов по данным ДЗЗ 101
- Баширова Э.М., Прахов И.В., Ушаков А.С., Ковальчук Г.Н.* Управление микропроцессорным блоком релейной защиты с использованием машинного обучения 110

<i>Максименко И.И.</i> Представимость классов автоматов Мили в терминах бэровских и р-адических метрик	118
<i>Петрова Н.К., Ситников С.Ю., Хамитов Р.М., Журавлёв П.В.</i> Применение объектно-ориентированного подхода в синтаксическом анализе для интеллектуальных систем	125
<i>Бездетный Н.А., Зори С.А.</i> Повышение эффективности визуального компьютерного моделирования на основе методов визуализации графов переходов	137

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

<i>Сурикова А.Н., Соловьева Е.В., Старостин А.В.</i> Повышение эффективности в блоках разделения нефтешламов за счет установки утилизационных ступеней	147
<i>Ряжских А.В.</i> Оценка тепловой эффективности пластинчатого теплообменника по критерию компактности	153
<i>Хвостов А.А., Ряжских А.В., Хаустов И.А., Иванов А.В.</i> Моделирование динамики концентрационного поля в полусфере на термически неоднородной диффундирующей подложке	159
<i>Костюченко И.В., Старых А.В., Любская О.Г.</i> Оценка эффективности объекта коммунального энергетического комплекса	166
<i>Бирюков А.Б., Сидоров В.А., Ошовская Е.В.</i> Использование тепловизора при диагностировании водогрейного котла VITOMAX 200-LW	172
<i>Яковлев П.В., Андреев В.В., Пискунов В.М.</i> Моделирование движения теплоносителя в гигах кипятильных труб низкого давления прямоточных котлов-утилизаторов	181

ИНФОРМАЦИОННАЯ РУБРИКА

ФИЗТЕХУ - 60	187
Правила для авторов	198

Bulletin of Donetsk National University

SCIENTIFIC JOURNAL

FOUNDED IN 1997,
SERIES G FOUNDED IN 2018

Number dedicated to the 60th
anniversary of the founding of the
Faculty of Physics and Technology

Series G: Technical sciences

№ 2/2025

CONTENTS

ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT ENGINEERING AND COMMUNICATION

- Koptev G.I., Torina E.M.* Transistor single-ring RC-oscillators with low-pass filter 5
- Savotchenko S.E., Akapev V.L.* Simulation of a laser methane leak detection gas analyzer system using mini drones 19
- Pometun E.D.* Investigation of emissions from point sources using a thermoanemometer 30

INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

- Bondarenko V.I., Fedorov M.D.* Research on deep learning methods for handwritten text recognition 37
- Nestrugina E.S., Ganin R.IU.* Modeling circularly polarized navigation antenna on aerial vehicle 47
- Saltanaeva E.A., Kutsenko S.M.* Application of pattern recognition techniques in driver condition analysis for fatigue assessment using neural network technology 54
- Zverev G.I., Efimov A.O.* Detection and recognition of plants in nature using convolutional neural networks 61
- Kuizheva S.K., Dovgal V.A.* Information technologies for visualization of the social graph 76
- Grachev M.I.* Mathematical model of the dynamics of the states of the university functioning system in the conditions of automation 85
- Tretiakov I.A., Kulikova A.S., Dolbeshchenkova N.V., Stupak V.A.* Components of the automated system of scientific research of radio channels TEMPEST 94
- Nesova A.V., Kolesenkov A.N.* Combined approach based on SLIC method and Random Forest algorithms for monitoring forests based on remote sensing data 101
- Bashirova E.M., Prakhov I.V., Ushakov A.S., Kovalchuk G.N.* Control of microprocessor relay protection unit using machine learning 110

<i>Maksimenko I.I.</i> Representability of Mealy automatic classes in terms of Baer and p-adic metrics	118
<i>Petrova N.K., Sitnikov S.IU., KHamitov R.M., ZHuravlev P.V.</i> An object-oriented approach to syntactic analysis: methodological aspects for training specialists in intelligent systems	125
<i>Bezdetnyi N.A., Zori S.A.</i> Improving the efficiency of visual computer modeling based on transition graph visualization	137

ENERGETICS AND ELECTRICAL ENGINEERING

<i>Surikova A.N., Soloveva E.V., Starostin A.V.</i> Increased efficiency in oil sludge separation units due to the installation of recycling stages	147
<i>Riazhskikh A.V.</i> Assessment of thermal efficiency of a plate heat exchanger by compact criterion	153
<i>KHvostov A.A., Riazhskikh A.V., KHaustov I.A., Ivanov A.V.</i> Modeling the dynamics of a concentration field in a hemisphere on a thermally inhomogeneous diffundating substrate	159
<i>Kostiuchenko I.V., Sarykh A.V., Liubskaya O.G.</i> Assessment of the efficiency of the municipal energy complex facility	166
<i>Biriukov A.B., Sidorov V.A., Oshovskaya E.V.</i> Use of thermal imager in the diagnostics of a water heating boiler VITOMAX 200-LW	172
<i>IAkovlev P.V., Andreev V.V., Piskunov V.M.</i> Modeling of coolant movement in low-pressure boiling pipes bends of right-of-flow waste-recovery boilers	181

INFORMATION SECTION

PHYTECH are 60	187
Instructions for authors	198

Э Л Е К Т Р О Н И К А , Ф О Т О Н И К А ,
П Р И Б О Р О С Т Р О Е Н И Е И С В Я З Ь

EDN XFVNDP
УДК 621.373.5

DOI 10.5281/zenodo.15585894

ТРАНЗИСТОРНЫЕ ОДНОКОЛЬЦЕВЫЕ RC-АВТОГЕНЕРАТОРЫ С
ФИЛЬТРОМ НИЗКИХ ЧАСТОТ

© 2025 Коптев Г.И., Торина Е.М.

Представлены результаты анализа однокольцевого RC-автогенератора с фильтром нижних частот (ФНЧ) в цепи обратной связи, построенного на одном активном элементе (АЭ) в виде дифференциальной пары полевых транзисторов. Показано, что в отсутствии буферного повторителя за счет нелинейности нагрузки возникает дополнительный сдвиг фаз, что позволяет упростить схему ФНЧ и улучшить флуктуационные характеристики генератора. Использование модифицированного фильтра и нелинейного режима усилителя позволяет снизить требуемый коэффициент усиления, а также защитить генератор от срыва колебаний без использования дополнительных цепей. Результаты, полученные теоретически, подтверждены компьютерным моделированием.

Ключевые слова: RC-автогенератор, фазовый шум, полевой транзистор, дифференциальная пара транзисторов, трехзвенная RC-цепь.

Введение. Однокольцевые автогенераторы (АГ) почти гармонических колебаний, в цепи обратных связей (ОС) которых входят только сопротивления и емкости (далее RC-АГ) состоят из усилителя и фильтра положительной обратной связи, формирующей замкнутое кольцо. RC-автогенераторы не имеют в своем составе LC - колебательного контура, но они позволяют формировать колебания, близкие к гармоническим [1, 2].

Миниатюризация электронной аппаратуры, перемещение множества узлов, выполнявшихся на дискретных элементах относительно крупных размеров в интегральные схемы, особенно монолитные, имело в наше время одним из последствий очередное повышение интереса к RC-автогенераторам [2], особенно невысоких частот, по очевидной причине – стремлению избавиться от наиболее крупногабаритной детали – катушки индуктивности. Довольно крупной, даже при использовании ферромагнитного сердечника. Интерес к RC-генераторам возник ещё в ламповый период электроники, в 30-е годы XX века, задолго до появления интегральных микросхем, и уже объяснялся тогда рядом преимуществ RC-АГ гармонических колебаний [1], таких как простота реализации, относительно высокая стабильность частоты, а также возможность более широкой, по сравнению с LC-схемами, перестройки частоты при том же диапазоне вольтфарадной характеристики варикапов в частотно-задающих цепях.

Классические схемы RC-автогенераторов гармонических колебаний, особенно однокольцевые, должны работать на границе самовозбуждения с запасом по самовозбуждению, едва превышающем единицу. Однако, работа на границе самовозбуждения ведет к риску срыва колебаний, поэтому часто в таких схемах используют дополнительные решения, например, систему автоматической регулировки амплитуды (АРА) [3]. В данной работе по соображениям гарантии самовозбуждения откажемся и от режима генератора на границе самовозбуждения, и от системы авторегулирования, удерживающей генератор на этой границе.

Объектом исследования является RC-автогенератор с фильтром нижних частот (ФНЧ) в цепи обратной связи на дифференциальной паре полевых транзисторов (ПТ), работающий в нелинейном режиме, что за счет увеличения запаса по самовозбуждению гарантирует от срыва генерации. Далее, дифференциальная пара позволяет практически удалить в спектре колебаний четные гармоники. Выбор ПТ в качестве активных элементов (АЭ), обладающих высоким входным сопротивлением и хорошей повторяемостью характеристик, позволяет использовать усилитель без буферных каскадов, обеспечивая ток АЭ в ПТ с высокой точностью симметрии. Для получения формы выходного напряжения, близкой к гармонической, возможно использование внешнего по отношению к генератору фильтра, однако в этом случае увеличивается уровень фазовых шумов выходного колебания и количество элементов конечной схемы. Поэтому воспользуемся фильтром, уже содержащимся в кольцевом RC-генераторе в виде ФНЧ в качестве цепи положительной обратной связи. Выходное напряжение, близкое к синусоидальному, будем снимать не со стока, где оно относительно велико по размаху, но явно негармонично в нелинейном режиме, а с затвора, т.е. с выхода ФНЧ, где оно значительно меньше по амплитуде, но отфильтровано от высших гармоник. Можно, однако, также в качестве выходных снимать напряжения с промежуточных конденсаторов ФНЧ, с учетом требований ТУ на генератор по амплитуде и уровню высших гармоник.

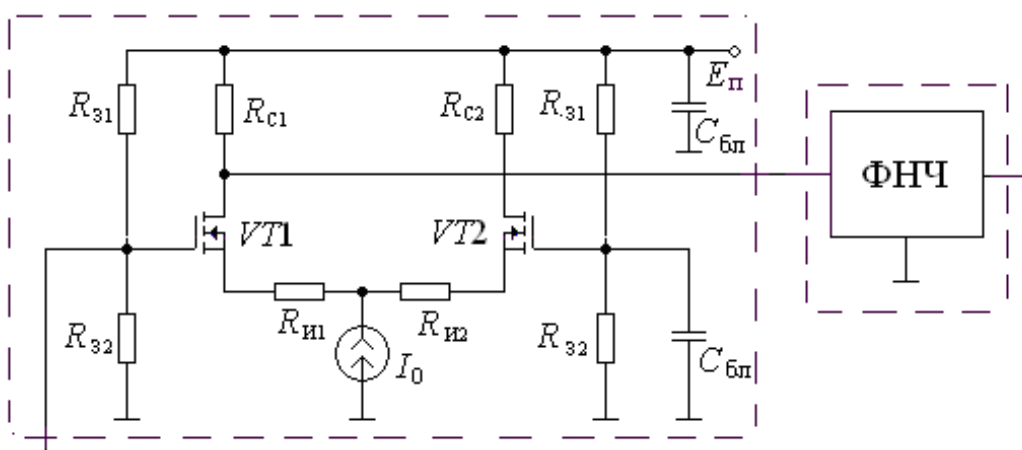


Рис. 1. Схема однокольцевого RC-автогенератора на дифференциальной паре полевых

Генерация на границе самовозбуждения. Обратимся сначала к работе генератора на границе самовозбуждения, в линейном режиме с гармоническими колебаниями. Это позволит лучше понять свойства классических схем RC-АГ [1].

Балансные уравнения. Предметом исследования является схема, показанная на рис. 1. Эквивалентная схема такого кольцевого RC-АГ показана на рис. 2. Для этой схемы ищется выражение комплексной динамической крутизны согласно её определению: $\dot{S}_{\text{дин}} = \dot{I}_c / \dot{U}$, где $\dot{I}_c$ – комплексная амплитуда тока стока АЭ, $\dot{U}$ – амплитуда напряжения на входе АЭ, поступающего с выхода ФНЧ.

Штриховой рамкой (рис. 2) обведена модель АЭ, характеризующаяся крутизной S статической проходной ВАХ и выходным сопротивлением R_i . Нагрузкой АЭ является параллельное соединение сопротивления резистора R_{c1} , через который в схеме АГ подаётся питающее напряжение на сток транзистора $VT1$ АЭ (рис. 1), и входного сопротивления ФНЧ, используемого в качестве четырёхполюсника – фазовращателя цепи положительной обратной связи генератора.

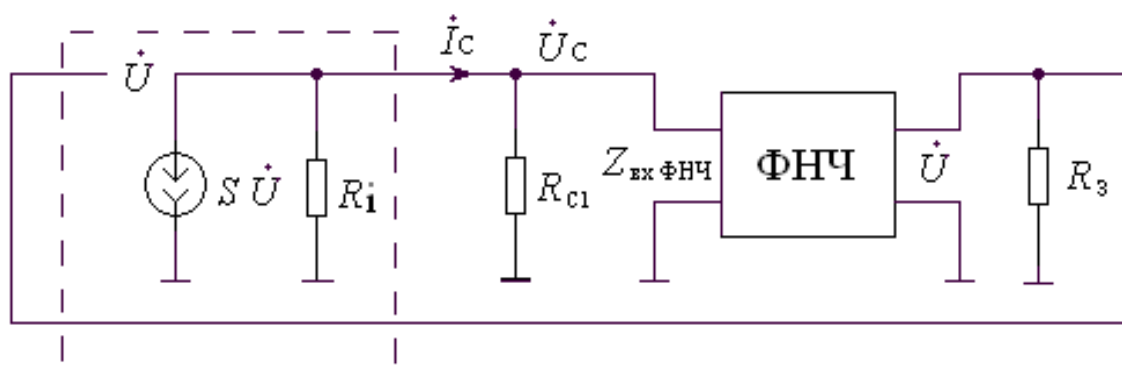


Рис. 2. Эквивалентная схема низкочастотного кольцевого RC-генератора

Четырёхполосник нагружен на резистор R_3 , выполняющий функцию сопротивления утечки на затворе АЭ. ФНЧ характеризуется комплексным коэффициентом передачи напряжения $\dot{K}_u = \dot{U}_c / \dot{U}$ с учётом сопротивления R_3 и комплексным входным сопротивлением $Z_{\text{вх ФНЧ}} = g_{\text{вх ФНЧ}} + j \cdot b_{\text{вх ФНЧ}}$. Согласно схеме рис. 1 и определению динамической крутизны, её вещественную и мнимую части можно представить в виде уравнений:

$$\begin{cases} \operatorname{Re}(\dot{S}_{\text{дин}}) = \operatorname{Im}(\dot{K}_u) \cdot b_{\text{вх ФНЧ}} - \operatorname{Re}(\dot{K}_u) \cdot \left(\frac{1}{R_c} + g_{\text{вх ФНЧ}} \right) \\ \operatorname{Im}(\dot{S}_{\text{дин}}) = -\operatorname{Im}(\dot{K}_u) \cdot \left(\frac{1}{R_c} + g_{\text{вх ФНЧ}} \right) - \operatorname{Re}(\dot{K}_u) \cdot b_{\text{вх ФНЧ}} \end{cases}, \quad (1)$$

Здесь известными, получаемыми в результате расчётов для заданной схемы ФНЧ в режиме балансов амплитуд и фаз, являются все величины в правых частях уравнений системы (1). Найденные значения $\operatorname{Re}(\dot{S}_{\text{дин}})$, $\operatorname{Im}(\dot{S}_{\text{дин}})$ используются далее для расчета искомых величин - статических параметров АЭ - S и R_i , которые необходимо обеспечить для установки генератора на границу возбуждения на заданной частоте.

Чтобы найти S и R_i , используем выражения $\operatorname{Re}(\dot{S}_{\text{дин}})$, $\operatorname{Im}(\dot{S}_{\text{дин}})$ через искомые S и R_i :

$$\begin{cases} \operatorname{Re}(\dot{S}_{\text{дин}}) = S \cdot R_i \cdot (R_i + r_n) / \left[(R_i + r_n)^2 + x_n^2 \right] \\ \operatorname{Im}(\dot{S}_{\text{дин}}) = -S \cdot R_i \cdot x_n / \left[(R_i + r_n)^2 + x_n^2 \right] \end{cases}. \quad (2)$$

Решая систему (2) относительно искомых S и R_i , получаем:

$$\begin{cases} R_i = -\left(\operatorname{Re}(\dot{S}_{\text{дин}}) / \operatorname{Im}(\dot{S}_{\text{дин}}) \right) \cdot x_n - r_n \\ S = -\operatorname{Im}(\dot{S}_{\text{дин}}) \cdot \left[(R_i + r_n)^2 + x_n^2 \right] / (R_i \cdot x_n) \end{cases}, \quad (3)$$

где r_n и x_n - действительная и мнимая части нагрузки активного элемента, состоящей из R_{c1} и $Z_{\text{вх ФНЧ}}$.

Динамическая крутизна проходной ВАХ даже в случае безынерционного АЭ оказывается комплексной из-за комплексности нагрузки АЭ, а её фаза определяется согласно уравнениям (3):

$$\varphi_{\text{дин}} = -\arctg \left[x_{\text{н}} / (R_i + r_{\text{н}}) \right] .$$

Она входит в состав суммы углов, определяющих баланс фаз и частоту генерации:

$$\varphi_{\text{ФНЧ}} + \varphi_{\text{ЗВХ ФНЧ}} + \varphi_{\text{дин}} + \pi = 0 .$$

Формулы для коэффициента передачи напряжения ФНЧ и его входного импеданса приводят к выражениям высоких степеней, осложняющих аналитическое решение.

Решение балансных уравнений. Поэтому оказалось целесообразным использовать вычислительные возможности компьютера. Были составлены циклические программы, решающие балансные уравнения при различных исходных данных. Ниже приводятся примеры их использования для характерных случаев.

1) Классическая задача. Созданная для расчета кольцевой схемы РС-АГ синусоидальных колебаний с однородным четырёхзвенным ФНЧ в цепи обратной связи [1] программа подтвердила классическое $|K_u|_{\min} = 18.38$, $\varphi_{\text{ФНЧ}} = -180^\circ$, но показала, что при этом фаза входного импеданса ФНЧ равна $\varphi_{\text{ЗВХ ФНЧ}} = -24.05^\circ$. Кроме того, программа показала, что генерация на частоте $f = f_0$, соответствующей $\varphi_{\text{ФНЧ}} = -180^\circ$ возможна, если вход генераторного АЭ имеет большое сопротивление (теоретически ХХ), а выход генераторного АЭ нагружен только активным сопротивлением R_{c1} , через которое на сток генераторного АЭ подаётся питающее напряжение. Это возможно, если вход ФНЧ подключен к выходу генераторного АЭ через идеальный повторитель с очень высоким входным импедансом. При этом АЭ, нагруженный на R_{c1} , должен обеспечить усиление напряжения не менее $|K_u|_{\min} = 18.38$. Такая схема содержит два АЭ [1]. Заметим, что РС-АГ по схеме с одним АЭ и однородным ФНЧ [2], в принципе не может генерировать на частоте $f = f_0$, поскольку её условие баланса фаз в режиме генерации осложняется вхождением в него фазы входного импеданса ФНЧ (-24 градуса). В предельном случае, если сопротивление $R_{c1} \gg |Z_{\text{вх ФНЧ}}|$ на частоте баланса фаз, а вход АЭ можно считать имеющим бесконечно большое входное, обнаружено компьютерным расчётом, что теоретически возможна генерация на частоте $f = 0.6832f_0$, если модуль усиления АЭ по напряжению $|K_u| \geq 9.6$.

2) Интересные результаты получаются, если отказаться от однородных четырёхполюсников – фазовращателей, например, в виде ФНЧ, составленных из нескольких одинаковых интегрирующих РС – звеньев, а также от известных «прогрессивных цепочек» [1]. Трудность реализации кольцевого РС – генератора синусоидальных колебаний по простейшей схеме – с трёхзвенным однородным фазовращателем – на дифференциальной паре полевых транзисторов из-за недостаточного усиления напряжения (известный теоретический минимум $|K_u|_{\min} = 29$) заставила обратиться сначала к четырёхзвенному однородному фазовращателю (его известный теоретический минимум $|K_u|_{\min} = \sim 18.4$). Но и с таким ФНЧ трудно создать кольцевой генератор на дифференциальной паре полевых транзисторов из-за недостатка усиления.

Известен способ построения со значительно меньшим усилением, использующий в качестве ФНЧ комбинацию так называемых «прогрессивных цепочек» [1] из неодинаковых RC-звеньев. Однако такое решение имеет недостатки – увеличивается номенклатура элементов фазовращателя, а последние звенья могут оказываться с чрезмерно высокоомными резисторами и слишком малыми емкостями конденсаторов, сравнимыми с паразитными (это может затруднять микросхемную реализацию и ухудшать кратковременную стабильность частоты). Кроме того, повысится чувствительность к наводкам внешних полей.

Модифицированный фильтр. Была обнаружена возможность создания более простых фазовращателей типа ФНЧ, путём изменения и упрощения лишь первого звена однородного фазовращателя. В этом варианте изменяется только ёмкость конденсатора C_1 (увеличивается), а резистор R_1 в его обычном включении устраняется. Роль активного сопротивления, образующего первое фазовращающее звено, принимает на себя резистор R_{c1} , включаемый обычно между стоком и источником питания. Главным результатом такого изменения схемы оказалась возможность снизить минимально необходимое усиление напряжения, особенно дефицитное для дифференциальных пар полевых транзисторов в качестве АЭ кольцевых генераторов из-за того, что крутизна проходной характеристики дифференциальной пары вдвое ниже крутизны проходной ВАХ одиночного транзистора.

Нелинейный генератор. Постановка задачи. Поясним значение термина «нелинейный генератор» в данном контексте. Как известно, любой генератор, имеющий устойчивый стационарный режим – нелинейное устройство. Генерируемые АГ колебания в принципе не могут представлять собой синус в математически строгом смысле, даже если не касаться шумовых процессов. Однако в литературе устоялся термин «RC - генераторы синусоидальных колебаний» применительно к классу генераторов с относительно низким уровнем кратных гармоник (коэффициентом гармоник порядка 10% и ниже), позволяющий отличать их от, например, релаксационных RC-генераторов «разрывных» колебаний с высоким уровнем кратных гармоник, называемых мультивибраторами. В данной работе решается задача построения и исследования генератора с запасом по самовозбуждению, гарантирующим от срыва генерации, т.е. генератора в существенно нелинейном режиме, но при этом с относительно малым уровнем кратных гармоник.

Спектральный состав тока активного элемента. На рис. 3а показана форма тока АЭ $i(\omega t)$ без отсечки. Идеализированную форму, показанную на рис. 3б имеет ток стока дифференциальной пары $i_d(\omega t)$ идентичных полевых транзисторов в нелинейном режиме при работе генератора в области частот, на которых не проявляются заметно инерционные свойства транзисторов. Параметры этой формы:

- b - высота полуволн обрезанной синусоиды,
- A - амплитуда порождающей синусоиды,
- a - угловая длительность фронта полуволны, радиан.

Форма тока, представленная на рис. 3б, обеспечивается свойствами идеальной дифференциальной пары транзисторов, возбуждаемой синусоидальным напряжением с выхода ФНЧ, и питаемой в точке соединения истоков пары ПТ генератором постоянного тока.

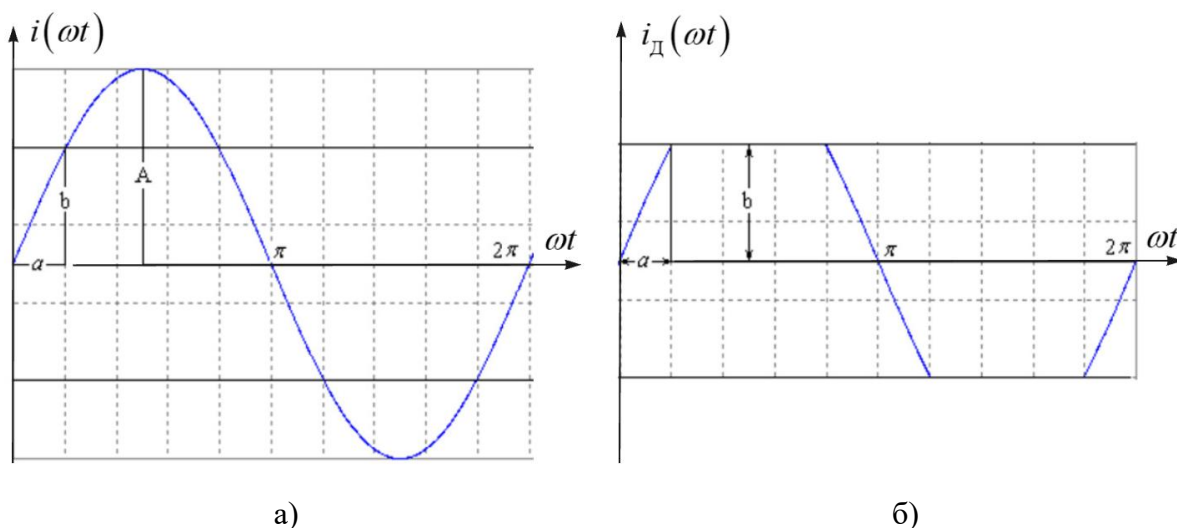


Рис. 3. Формы токов генератора:

а) синусоидальная; б) симметрично усеченного синуса

Гармонический анализ формы усечённого синуса можно выполнить на основе известного гармонического анализа косинусоидальных импульсов, рассматривая полуволну усечённого синуса как разность косинус - импульса с высотой A , равной амплитуде производящего синуса, с углом отсечки $\pi/2$, и косинус-импульса в виде срезанной части производящего синуса высотой $A - b$ с углом отсечки $\theta_b = \pi/2 - \alpha$, где b – высота полуволны срезанного синуса. Результатом такого анализа являются выражения для первой и высшей гармоник усеченного синуса:

$$A_1 = \frac{1}{\pi} \left[A \cdot \arcsin\left(\frac{b}{A}\right) + b \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{b}{A}\right)^2} \right], \quad (4)$$

$$A_n = \frac{b - A}{1 - \cos(\theta_b)} \cdot \frac{1}{n \cdot \pi} \cdot \left[\frac{\sin[(n-1) \cdot \theta_b]}{n-1} - \frac{\sin[(n+1) \cdot \theta_b]}{n+1} \right].$$

Заметим, что, хотя в составе однополярного косинусоидального импульса, кроме нечётных присутствуют и чётные гармоники, в усечённом синусоидальном колебании тока дифференциальной пары ПТ остаются только нечётные гармоники.

Ниже приведена таблица 1, показывающая уровни подавления третьей гармоники по отношению к первой (рабочей) в спектре тока дифференциальной пары, возбуждаемой синусоидальным напряжением, для различных отношений A/b . Аналогичные таблицы по формулам (4) можно составить и для других высших гармоник. Практическое значение этой таблицы состоит в том, что эта величина – A/b – может рассматриваться как запас по самовозбуждению. Оно возможно только при $A > b$, и уменьшение обратного отношения b/A от 1 до 0 означает увеличение запаса по самовозбуждению. При выборе режима, характеризуемого угловой длительностью фронта α или однозначно связанным с ней запасом по самовозбуждению A/b , потребуется компромиссное решение, так как приближение A/b к 1 снижает уровень высших гармоник генератора, но приближает к срыву генерации. И наоборот, увеличение A/b делает генерацию более устойчивой к дестабилизирующим факторам и снижает требуемое усиление АЭ, но увеличивает уровень гармоник генератора.

Таблица 1. Третья гармоника усеченного импульса тока

Запас по самовозбуждению, A/b	Амплитуда 1-й гармоники усеченного импульса тока, A_1	Угловая длительность фронта, a	Уровень третьей гармоники относительно первой, A_3/A_1	Уровень третьей гармоники относительно первой, A_3/A_1 , дБ
2	1.217	30	0.227	-13
1.8	1.204	33	0.203	-13.9
1.6	1.184	38	0.171	-15.4
1.5	1.171	41	0.151	-16.5
1.4	1.154	45	0.126	-18
1.3	1.133	50	0.098	-20.3
1.1	1.064	65	0.029	-30.9
1.08	1.054	67	0.022	-33.3
1.06	1.043	70	0.015	-36.6
1.04	1.03	74	0.009	-41.4
1.02	1.016	78	0.004	-50
1.01	1.008	81	0.002	-58.7

Однако, уровни кратных гармоник характеризуют только спектр тока дифференциальной пары транзисторов. Уровень искажений, даваемых генератором, зависит от его полной схемы, содержащей ФНЧ, и от точек схемы, с которых снимается выходное напряжение. В рассматриваемых нами кольцевых генераторах с цепями обратной связи в виде ФНЧ целесообразной представляется возможность использования эффекта фильтрации генерируемых напряжений этими цепями, без использования внешнего фильтра. Ниже представлены соотношения амплитуд напряжений кратных гармоник к амплитуде основной (рабочей) гармоники на разных конденсаторах ФНЧ цепи обратной связи.

Результаты моделирования нелинейного RC-АГ с классическим трехзвенным ФНЧ. Ниже представлен расчёт, выполненный для схемы нелинейного АГ с классическим однородным трёхзвенным ФНЧ (рис. 4а).

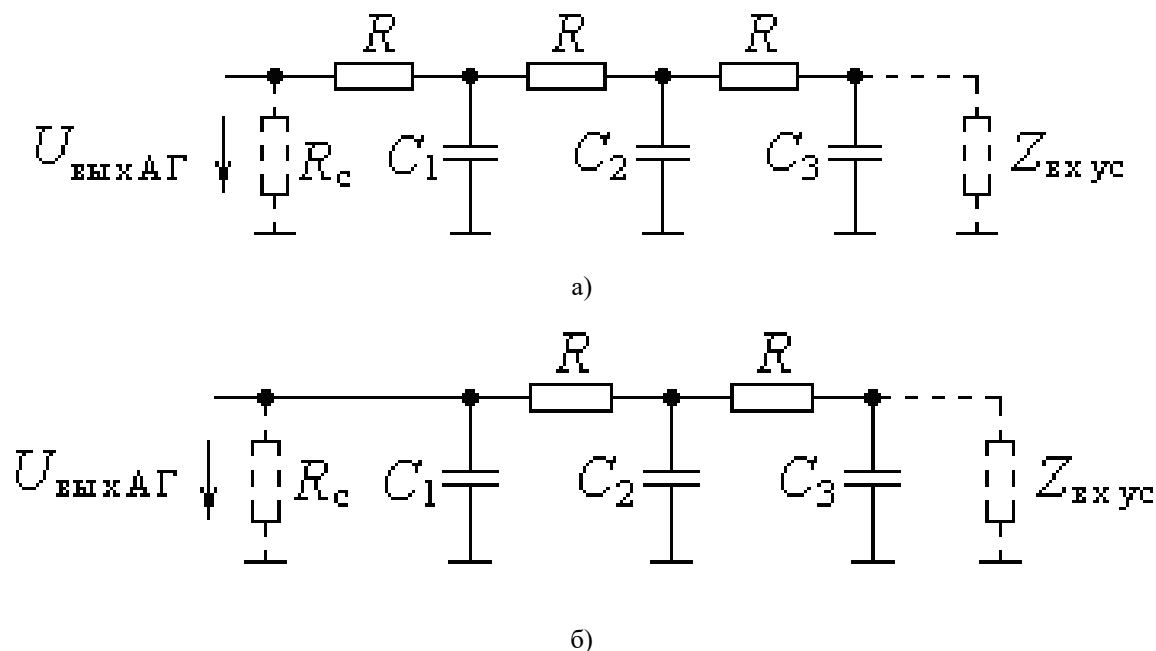


Рис. 4. Используемые фильтры: а) однородный трёхзвенный ФНЧ ($C_1=C_2=C_3=C$, $R_1=R_2=R_3=R$); б) модифицированный трехзвенный ФНЧ ($C_1 \neq C_2=C_3=C$, $R_1=0$, $R_2=R_3=R$)

Первое приближение по частоте основной (первой) гармоники для решения уравнений задается на частоте $f = f_0 = \frac{\sqrt{6}}{2\pi RC} = 1$ МГц. На этой частоте, вблизи которой происходит генерация, сдвиг фазы напряжения фильтром равен -180° . Как было показано выше, для схем, не содержащих повторитель, генерация происходит на частоте ниже f_0 , что подтвердило моделирование (таблица 2). Результаты расчёта приведены в таблице 3.

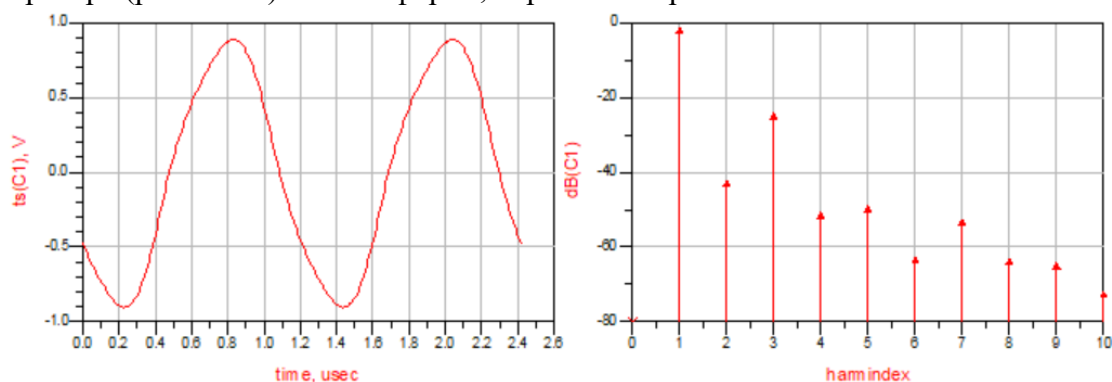
Таблица 2. Результаты расчета частоты генерации для первых 10 гармоник при моделировании нелинейного RC-АГ с однородным трехзвенным фильтром и с модифицированным трехзвенным фильтром

Номер гармоники	Частота, МГц	
	Однородный ФНЧ	Модифицированный ФНЧ
0	0	0
1	0.847	0.896
2	1.694	1.793
3	2.540	2.689
4	3.387	3.586
5	4.234	4.482
6	5.081	5.379
7	5.927	6.275
8	6.774	7.172
9	7.621	8.068
10	8.468	8.965

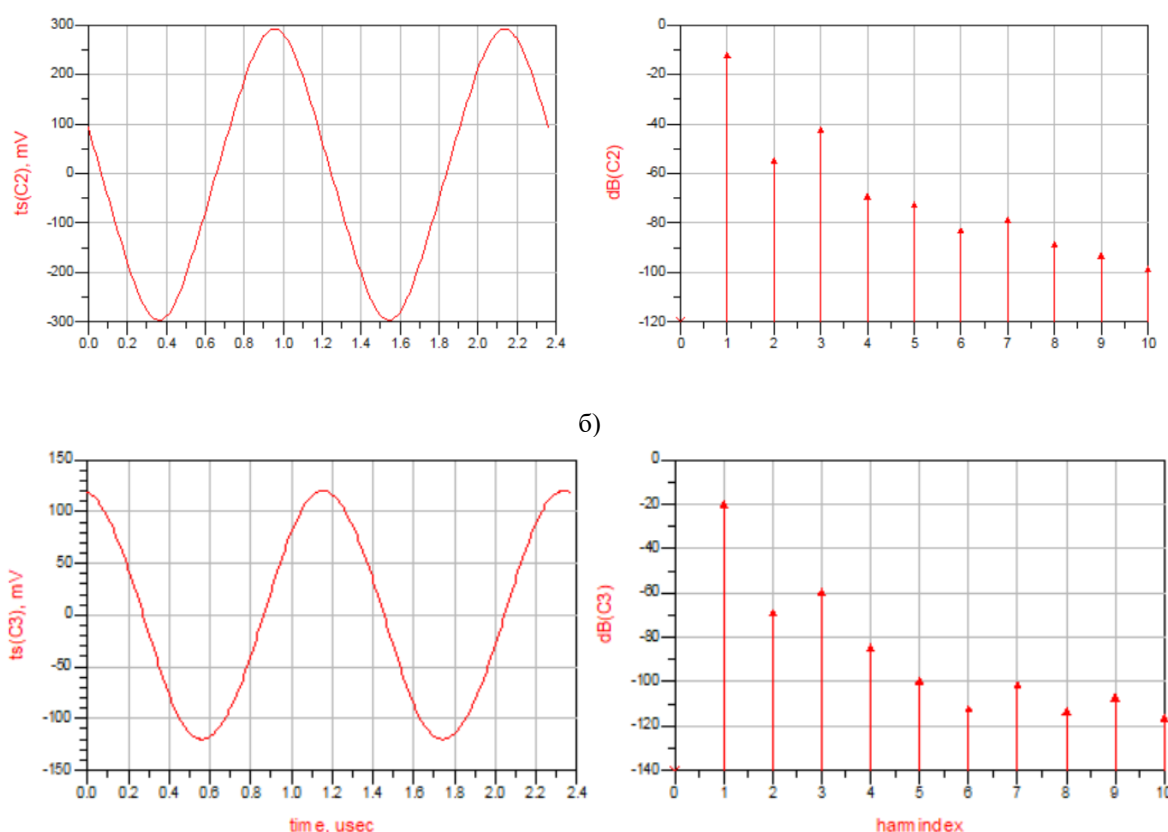
Таблица 3. Уровни амплитуд высших гармоник на конденсаторах однородного ФНЧ, нормированные к уровням амплитуд на выходе усилителя

f/f_0	$U_{C1}/U_{\text{вых}}, \text{дБ}$	$U_{C2}/U_{\text{вых}}, \text{дБ}$	$U_{C3}/U_{\text{вых}}, \text{дБ}$
1	-10.3	-20.8	-29.3
3	-17.8	-35.6	-53.0
5	-22.0	-43.9	-65.7

Таблица 3 показывает распределение напряжения основной частоты генерации вдоль фильтра. Амплитуда его на выходе ФНЧ (на конденсаторе C_3) в 29 раз ниже входной амплитуды, на конденсаторе C_2 – в 11 раз, на конденсаторе C_1 – в 3.26 раз. Для практических выводов относительно напряжений высших гармоник на конденсаторах фильтра нагляден спектральный состав напряжения, снимаемого в разных точках генератора (рис. 5 а–в) – слева форма, справа спектр.



a)



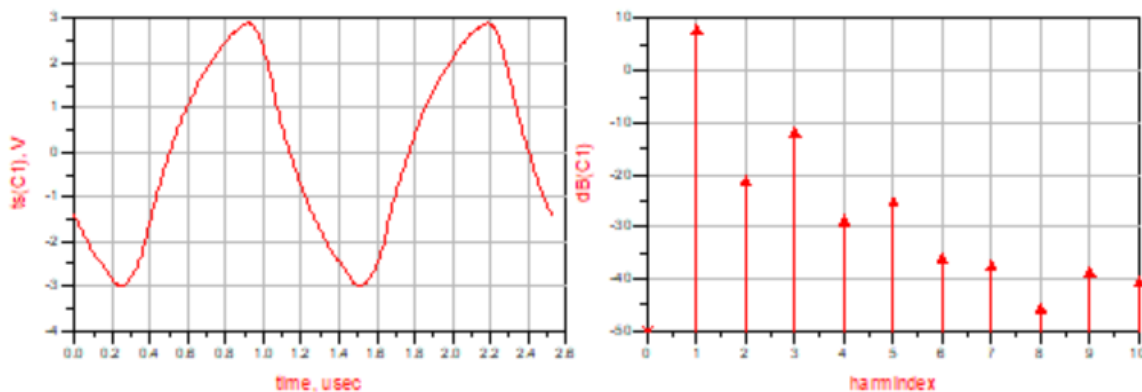
б)

в)

Рис. 5. Результаты компьютерного моделирования нелинейного RC-автогенератора с классическим однородным трехзвенным RC-фильтром. Осциллограммы напряжений генератора, снимаемые с конденсаторов C_1 (а); C_2 (б); C_3 (в), и их спектры

Сопоставляя результаты таблицы 2 и рис. 5, можно видеть, что есть выбор: снимая напряжение с последнего конденсатора ФНЧ (C_3), можно получить высшую степень фильтрации ценой значительного снижения уровня напряжения.

Результаты моделирования RC-АГ с модифицированным трехзвенным ФНЧ. Резистор R_c в обеих схемах (рис. 4) – это резистор в цепи питания транзистора VT1. Ёмкость изменённого звена увеличена в модифицированном фильтре в 6 раз, сопротивление R_1 бывшего первого звена обнулено.



а)

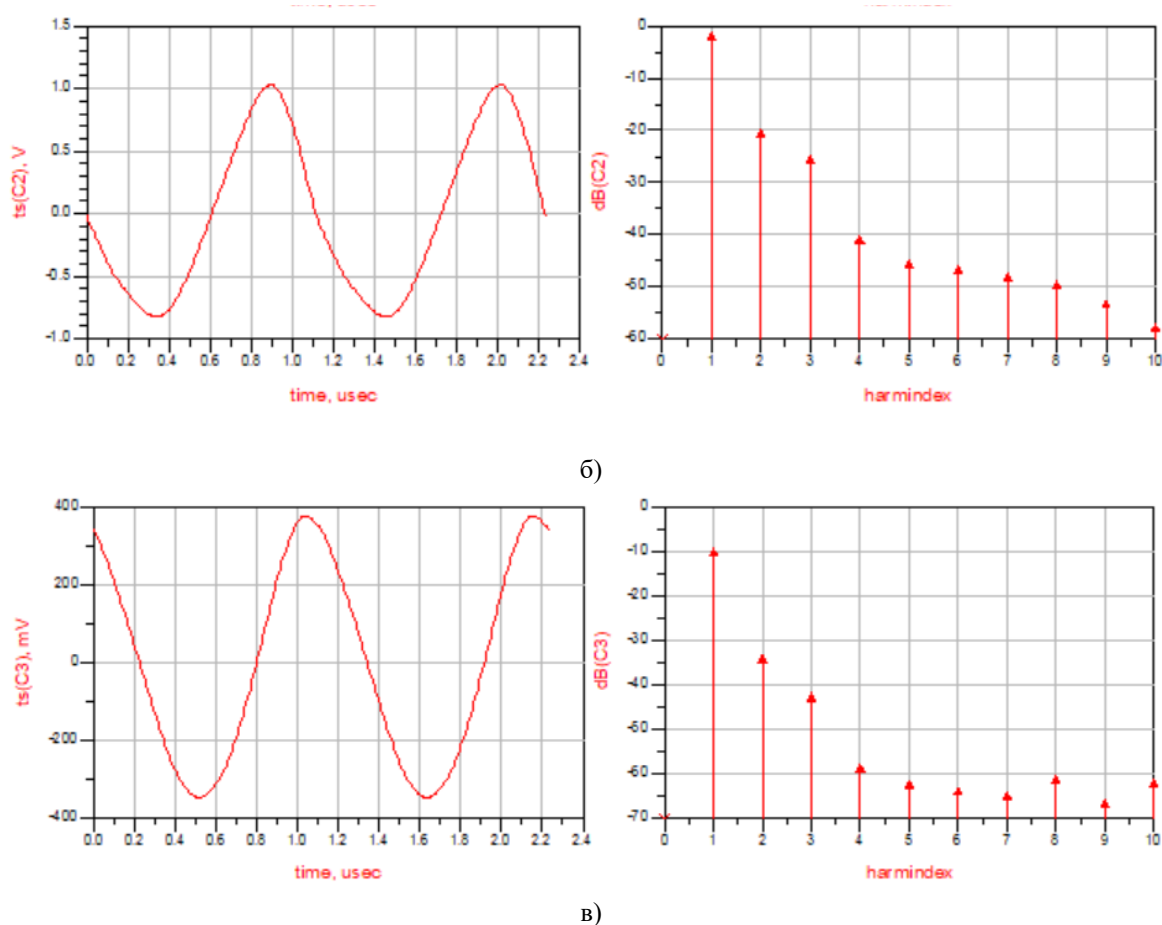


Рис. 6. Результаты компьютерного моделирования нелинейного RC-автогенератора с модифицированным трехзвенным RC-фильтром. Осциллограммы напряжений генератора, снимаемые с конденсаторов C_1 (а); C_2 (б); C_3 (в), и их спектры

Поскольку рабочая частота при переходе от схемы рис. 4а к схеме рис. 4б сохраняется, а номиналы второго и третьего звеньев оставлены неизменными, то коэффициент передачи напряжения первой гармоники $K_{u\text{ФНЧ}} = U_1/U_2$ в модифицированном ФНЧ был бы выше в 1.5 раза, если бы сохранялось условие противофазности выходного U_1 и входного U_2 напряжений ФНЧ. Это требование в классических кольцевых АГ (например, [1]) возникало из предпосылки, что якобы активный элемент поворачивает фазу напряжения на 180 градусов, и для баланса фаз при работе АГ необходим доворот фазы цепью обратной в случае ФНЧ на -180 градусов. Однако это верно лишь для схем с повторителем между АЭ и входом ФНЧ. Если повторителя нет, АЭ генератора нагружен на вход ФНЧ, имеющий комплексное сопротивление (активно-емкостное), и, несмотря на шунтирование входа ФНЧ резистором в цепи питания, нагрузка на АЭ генератора остаётся не активной, а сильно выраженной комплексной. Тогда, как было показано расчетом в п. 1.2, в балансе фаз появляется отрицательный фазовый угол активно-емкостной нагрузки, и нужный угол запаздывания на ФНЧ оказывается на десятки градусов ниже 180 градусов. А это означает, что исчезает необходимость в классической трёхзвенной структуре цепи обратной связи и можно обойтись двумя RC-звеньями в цепи обратной связи.

Таблица 4. Уровни амплитуд высших гармоник на конденсаторах модифицированного ФНЧ, нормированные к уровням амплитуд на выходе усилителя

f/f_0	$U_{C1}/U_{\text{вых}}, \text{дБ}$	$U_{C2}/U_{\text{вых}}, \text{дБ}$	$U_{C3}/U_{\text{вых}}, \text{дБ}$
1	-0.02	-9.98	-17.8
3	-0.02	-14.00	-27.18
5	-0.02	-16.94	-33.29

В таблице 4 представлено распределение напряжения основной частоты на конденсаторах фильтра. Результаты моделирования нелинейного RC-АГ представлены на рис. 4б и рис. 6 (а-в). Выигрыш в K_u в этом случае оказывается равным ≈ 1.6 .

Шумовые характеристики. С развитием техники растут требования к стабильности частоты автогенератора, поэтому важной характеристикой в рамках оценки кратковременной нестабильности частоты является определение уровня фазовых шумов в зависимости от частоты отстройки от несущей [4, 5]. Существует несколько подходов к оценкам уровней фазового шума. В [4] был предложен метод оценки шумов однокольцевых RC-автогенераторов, основанный на развитии метода укороченных уравнений Евтянова С. И. и получены аналитические выражения для расчета фазовых шумов в зависимости отстройки от несущей в области действия естественных шумов:

$$S_{\varphi}(F) = \frac{f_0^2}{\tau_{\varphi}^2 \cdot F^2} \cdot \frac{M^2 \cdot \tau_{\varphi a}^2 \cdot (F^2/f_0^2) + \Pi_{\text{пц}}^2}{\tau_{\varphi a}^2 \cdot (F^2/f_0^2) + \Pi_{\text{пц}}^2} \cdot \frac{2S_{\Sigma}(f_0)}{U_{\text{ст}}^2}, \quad (5)$$

где f_0 – частота возбуждения колебаний; $S_{\Sigma}(f_0) = S_u(f_0) + S_{\text{вх.ш}}$ – сумма спектральной плотности мощности (СПМ) приведенных ко входу усилителя источников естественных шумов цепи обратной связи ($S_u(f_0)$) и спектр плотности шумов самого усилителя ($S_{\text{вх.ш}}$), приведенный на его вход; F – частота анализа уровня шума; $U_{\text{ст}}$ – амплитуда колебаний генератора на входе усилителя в установившемся режиме; $\tau_{\varphi a}$ – нормированная постоянная времени, связанная с обобщенной постоянной времени цепи ОС $T_{\varphi a}$ выражением $\tau_{\varphi a} = 2\pi f_0 T_{\varphi a}$, где $T_{\varphi a} = T_{\varphi}(1 + (T_a/T_{\varphi})^2)$, где T_a и T_{φ} – взятые с обратным знаком производные логарифмической амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик цепи обратной связи по частоте на частоте возбуждения АГ соответственно и $\tau_{\varphi} = 2\pi f_0 T_{\varphi}$; $\Pi_{\text{пц}}$ – прочность предельного цикла автогенератора; M – параметр, характеризующий влияние амплитудно-частотного преобразования в генераторе на СПМ $S_u(f_0)$.

Уровни СПМ ФМ шумов АГ при отстройках от частоты f_0 , равных ($\pm F$), выражают в децибелах относительно мощности колебания и рассчитывают по формуле:

$$L_{\varphi}(F) = 10 \cdot \lg(S_{\varphi}(F)) - 3, [\text{дБн/Гц}]. \quad (6)$$

Достоинством этого метода является отсутствие в выражении эмпирических множителей, что позволяет разрабатывать схему с учетом количественных ограничений уровня шума, а также получение оценки уровня шума «сверху». То есть реальные значения СПМ фазового шума ниже менее чем на 1 дБ от рассчитанных.

Применим данный метод к рассмотренным в работе схемам и сравним уровни шума на входе усилителя для нелинейного автогенератора с классическим однородным и с модифицированным фильтром. Результаты теоретического расчета на основе выражения (6) представлены на рис. 7. В данном случае учитывались только шумы цепи ОС, однако при необходимости можно рассчитать и шум, вносимый усилителем.

По результатам расчета видно, что модифицированный фильтр за счет отсутствия одного резистора позволяет получить существенный выигрыш в уровне шума порядка 2.5 дБн/Гц в области действия естественных шумов.

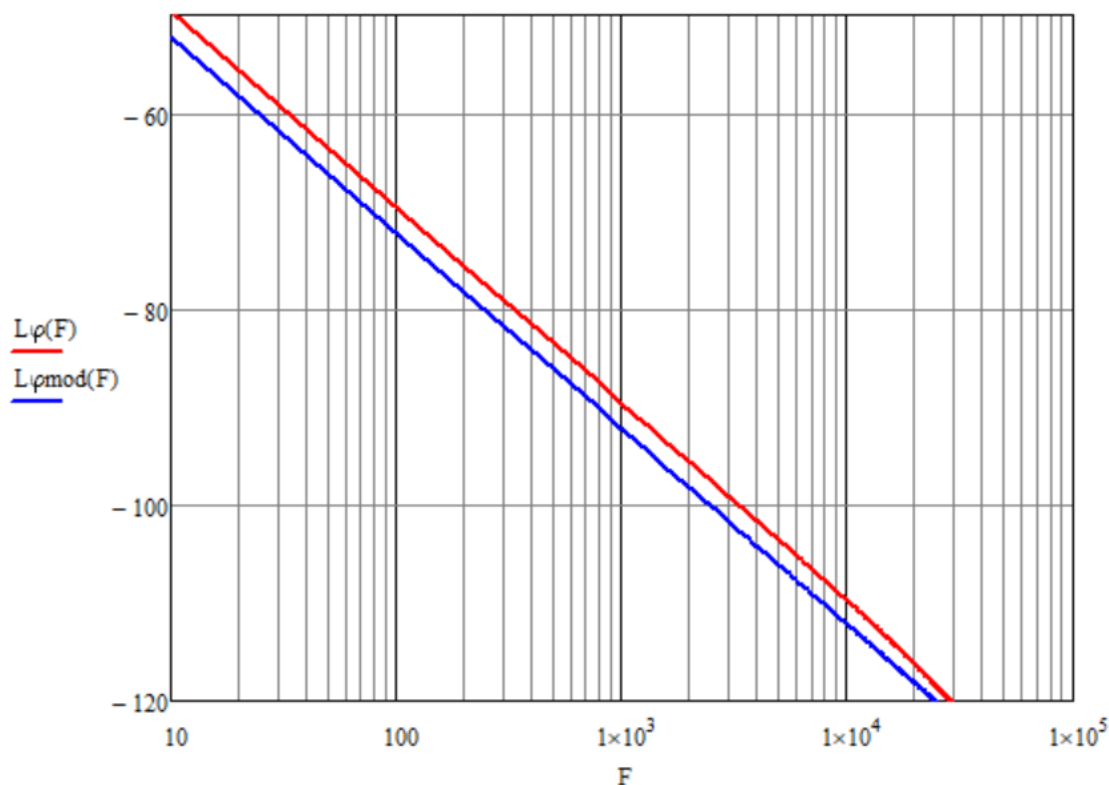


Рис. 7. Результаты расчета СПМ фазового шума для нелинейного RC-автогенератора с классическим однородным трехзвенным фильтром ($L_\varphi(F)$) и с модифицированным фильтром ($L_{\varphi mod}(F)$)

Отметим, что основной вклад в шум цепи ОС вносят резисторы, входящие в состав фильтров. В пакетах компьютерного моделирования шумовая модель резисторов обычно учитывает только тепловой шум, заданный по известной формуле Найквиста, что верно для проволочных резисторов, однако может быть ошибочным для других типов резисторов, где существенный вклад могут вносить дробовые шумы. Представленный метод (5) позволяет учесть все источники шума, однако в данной работе при сравнении шумовых свойств двух схем мы ограничились учетом только тепловых шумов резисторов, чтобы сопоставить полученные результаты с моделированием.

Результаты расчета СПМ фазового шума на частоте отстройки от несущей 10 кГц, полученные с помощью аналитических выражений (5), (6) и моделированием, представлены в таблице 5. Видно, что расхождение значений не более 1 дБн/Гц.

Таблица 5. Результаты теоретического расчета и моделирования уровня СПМ фазовых шумов на частоте отстройки от несущей в 10 кГц для двух вариантов цепи ОС нелинейного RC-автогенератора

Тип расчета		Теоретический расчет	Моделирование
Вид фильтра	Классический		
	трехзвенный фильтр	-109.8 дБн/Гц	-110.8 дБн/Гц
Модифицированный фильтр		-112.2 дБн/Гц	-113.1 дБн/Гц

Выводы.

1. В литературе, посвященной кольцевым RC-генераторам гармонических колебаний, т.е. использующим в качестве цепей положительной обратной связи цепочечные (многозвенные, часто трёхзвенные, реже четырёхзвенные) четырёхполюсники в виде ФВЧ или ФНЧ, отмечается дефицит усиления активного элемента по напряжению. Например, в случае трёхзвенного ФВЧ или ФНЧ, минимальное усиление напряжения лампой или транзистором должно быть не менее 29, а в случае четырёхзвенного не менее 18.4. Это, однако, справедливо для однородных четырёхполюсников (т.е. составленных из одинаковых звеньев). В данной работе показано, что, используя простое нестандартное решение, не прибегая к «прогрессивным цепочкам», можно существенно (на десятки %) снизить необходимое минимальное усиление напряжения активным элементом кольцевого генератора, что особенно актуально для АЭ в виде дифференциальной пары полевых транзисторов.

2. Такое решение за счет исключения резистора первого звена фильтра позволяет также улучшить шумовые характеристики схемы, что подтверждено и теоретическим расчетом и моделированием.

3. В литературе, посвященной RC-генераторам гармонических колебаний, указывается, что для обеспечения практически синусоидальной формы выходного напряжения генератор должен работать на границе самовозбуждения. Однако это означает угрозу срыва генерации при любых причинах, снижающих коэффициент усиления активного элемента (АЭ) генератора. Преследуя цель обеспечить гарантию от срыва генерации при воздействии указанных возможных причин срыва, можно отказаться от работы генератора на границе самовозбуждения, предусматривая некоторый запас усиления АЭ. Следствием этого является относительно высокий уровень кратных гармоник в токе активного элемента. Отсюда вытекает задача каким-то образом уменьшить рост кратных гармоник напряжения на выходе генератора. В связи с этим рассмотрен вариант построения RC-генератора, в качестве АЭ которого используется дифференциальная пара полевых транзисторов. Особенностью их режима является симметричная форма полуволн выходного напряжения, практически исключая чётные гармоники на выходе генератора. Кроме того, выбрана кольцевая схема этого генератора с фазосдвигающей цепью положительной обратной связи в виде фильтра нижних частот. Это дает возможность снимать выходное напряжение генератора с выхода ФНЧ (это одновременно вход АЭ), имеющее уровень подавления кратных гармоник на десятки дБ ниже, чем на выходе АЭ, откуда обычно снимается выходное напряжение. Для повышения уровня выходного напряжения генератора есть возможность без усложнения схемы снимать большие по размаху напряжения также с других конденсаторов ФНЧ ценой увеличения уровня кратных гармоник этих напряжений. Сравнение такой схемы RC-генератора с известными из литературы схемами методом составления балансных уравнений и их циклического компьютерного решения, подтвержденным методом компьютерного моделирования показало, что она далеко превосходит простейшие схемы класса кольцевых генераторов на биполярных транзисторах по подавлению кратных гармоник на выходе и приближается к лучшим, имеющим систему автоматического регулирования амплитуды, но обладает большим быстродействием при необходимости скачкообразного изменения частоты.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Асеев, Б. П. Основы радиотехники / Б. П. Асеев. – М.: Связьиздат, 1947. – 572 с.
2. Wen, D. Analysis of the RC Phase-shift Oscillator / D. Wen // 12th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI). – 2019. – P. 1-4. – DOI 10.1109/CISP-BMEI48845.2019.8966078.
3. Торина, Е. М. Система автоматической регулировки амплитуды колебаний для однокольцевого RC-автогенератора // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. – 2018. – №. 5. – С. 152-157. – DOI 10.24160/1993-6982-2018-5-152-157. – EDN YCKICL.
4. Кулешов, В. Н. Шумовые характеристики RC-генераторов гармонических колебаний / В. Н. Кулешов, Т. И. Болдырева, Е. М. Дроздова // Электросвязь. – 2014. – №. 5. – С. 30-33. – EDN SHDSBH.
5. Koo, J. Low-Noise Distributed RC Oscillator / J. Koo, J.-Y. Sim // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. – 2022. – V. 30. – № 2. – P. 143-152. – DOI 10.1109/TVLSI.2021.3131170.

Поступила в редакцию 24.02.2025 г., рекомендована к печати 12.03.2025 г.

TRANSISTOR SINGLE-RING RC-OSCILLATORS WITH LOW-PASS FILTER

Koptev G.I., Torina E.M.

The analysis results of single-ring RC-oscillator with low-pass filter (LPF) in the feedback loop, built on one active device (AD) in the form of a differential pair of field-effect transistors are given. It was shown that without buffer followers an additional phase shift occurs in phase balance because of non-linear load. It allows us to make LPF scheme simpler and to improve oscillators fluctuation characteristics. Using modified filter amplifiers non-linear mode allows to reduce the required gain. Moreover, it allows to protect oscillator from disruption of fluctuations without using additional circuits. The results obtained theoretically were confirmed by computer modeling.

Keywords: RC-oscillator, phase noise, field-effect transistor, differential pair of transistors, three-link RC-circuit.

Коптев Глеб Иванович

кандидат технических наук, доцент кафедры формирования и обработки радиосигналов ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет "Московский Энергетический Институт"»,
Российская Федерация, г. Москва.
E-mail: KoptevGI@mpei.ru

Koptev Gleb Ivanovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Formation and Processing of Radio Signals of Moscow Power Engineering Institute,
Russian Federation, Moscow.

Торина Елена Михайловна

кандидат технических наук, доцент кафедры формирования и обработки радиосигналов ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет "Московский Энергетический Институт"»,
Российская Федерация, г. Москва.
E-mail: dro.em@yandex.ru

Torina Elena Mikhailovna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Formation and Processing of Radio Signals of Moscow Power Engineering Institute,
Russian Federation, Moscow.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОАНАЛИЗАТОРНОЙ СИСТЕМЫ ЛАЗЕРНОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ УТЕЧЕК МЕТАНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИНИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

© 2025 Савотченко С.Е., Акапьев В.Л.

Исследование возможности создания модели газоанализаторной системы лазерного детектирования утечек метана с использованием мини беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) на современной элементной базе, позволяющих осуществлять детектирование утечек на объектах газотранспортной инфраструктуры в реальном масштабе времени и безопасных условиях. Методика исследования заключается в моделировании спектральных характеристик воздушно-метановой газовой смеси с целью разработки прототипа лазерного газоанализатора, работающего в оптимальном спектральном диапазоне для определения концентраций ее компонентов. Обоснован выбор элементной базы для разработки прототипа лазерного детектора метана с учетом планируемого размещения на беспилотных летательных аппаратах класса мини. Проведено моделирование спектров поглощения детектируемых веществ, на основе которого определены оптимальные диапазоны длин волн лазера. Практическая значимость заключается в том, что предложена модель построения прибора, произведен расчет его технических характеристик и выполнен подбор компонентов системы. Разработана функциональная схема лазерного детектора и подобраны ее оптические компоненты. Предложены модели использования разработанной системы лазерного детектирования метана на мини БПЛА с привязкой к его средней скорости, высоты полета и конструкционными особенностями.

Ключевые слова: лазерный детекторный комплекс, детектирование веществ, утечка метана, газоанализатор, БПЛА.

Введение. В настоящее время безопасность в газотранспортной индустрии исключительно важна, особенно там, где газопровод проходит по приграничным территориям, относящимся к зонам повышенной опасности. В связи с этим принимает особую важность постоянный мониторинг выбросов и детектирование утечек [1].

За прошедшие годы физические подходы и технологии, используемые для дискретного обнаружения утечек, практически не изменились, однако бурно развивается элементная база приборостроения [2]. Одной из таких технологий является использование лазерного детектирования утечек газа, которое играет важную роль в контроле целостности газотрубопроводов [3].

Для безопасного и дистанционного измерения утечки или скопления газа, в частности, метана, используется ручной лазерный детектор газов [4]. Одной из важных проблем проектирования таких газоанализаторных систем является необходимость уменьшения их размеров. Особенно это становится актуальным для систем, которые устанавливаются на беспилотные летательные аппараты (БПЛА) [5].

Несомненно, временной аспект, а именно частота контроля, является ключевым элементом в программе выявления утечек, что напрямую связано как с вопросами безопасности, так и с возможностью сэкономить финансовые ресурсы. Именно поэтому технология контроля утечек метана вдоль газотрубопроводов с использованием лазерных детекторов, установленных на БПЛА, представляется наиболее эффективной и безопасной, по сравнению с использованием ручных детекторов [6].

Следует отметить, что существуют технологии детектирования утечек метана, основанные на применении БПЛА. Одним из примеров является детектор Laser Methane mini, который монтируется на квадрокоптер и дает возможность выполнять обследования различных объектов, а также выявлять места утечек метана с минимальных высот [7]. Также существуют аналоги типа Sniffer4D V2.0 [8] и газовый анализатор иного типа, к примеру, GasFinder-UAV OP-TDL, в котором анализатор и передатчик установлены на противоположных концах крыльев БПЛА [9].

Несмотря на имеющиеся приборы, необходимо развивать технологии лазерного детектирования утечек с использованием БПЛА. При этом одним из важных аспектов в данном направлении при проектировании детекторов является учет в совокупности как их электронно-оптических, так и массогабаритных характеристик.

Основная цель данной работы заключается в моделировании технологии разработки прототипа лазерного газоанализатора для определения концентрации метана в атмосфере, предназначенного для использования на БПЛА класса мини. В работе проводится оптимизация параметров лазерной детекторной системы с помощью моделирования спектральных характеристик для выявления наиболее подходящих спектральных диапазонов заданной смеси для дальнейшего определения концентраций, входящих в ее состав, компонентов. Результаты моделирования позволяют произвести расчет технологических параметров прототипа детектора, на основе которого осуществляется подбор элементной базы и проектирование, а также рекомендации по размещению спроектированного устройства на БПЛА.

Следует отметить, что в данной работе разрабатывается модель только оптической части устройства без учета схемы регистрации, сохранения, обработки и передачи данных.

Моделирование спектров детектируемых веществ. В технологии проектирования лазерных детекторов моделирование спектров является важным этапом, необходимым для определения оптимальных технических параметров и далее выбора компонентов системы при проектировании прибора [10, 11].

Как известно, в соответствии с законом Бугера (при условии, что степень светопоглощения линейно зависит от концентрации вещества, то есть предполагается линейная зависимость оптической плотности от концентрации частиц в составе смеси), значение концентрации n_i вещества i в смеси определяется сечением поглощения σ_i :

$$n_i = -\frac{1}{L\sigma_i} \ln \frac{P}{qP_0}, \quad (1)$$

где L – длина пути, пройденного излучением через вещество, P – мощность излучения, фиксируемая приемником излучения, P_0 – мощность излучения, исходящая от источника, q – коэффициент поглощения [12]. Сечение поглощения соответствует таким линиям поглощения в спектре, где полосы поглощения других веществ отсутствуют, либо малы и не перекрывают исследуемые нами линии. Если полосы поглощения двух или более веществ, находящихся в смеси, не перекрываются, то ее анализ сводится к определению каждого компонента в отдельности. Также считается, что поглощением посторонних компонентов можно пренебречь. Учитывается прямо прошедшее ослабленное излучение, когда часть излучения, претерпевшая рассеяние, предполагается не попавшей в приемник. В периоды проведения измерений метеорологическая ситуация считается различающейся только концентрацией детектируемого газа. При этих условиях выполняется закон Бугера (1). Заметим также, что метан обладает узким, но интенсивной линией поглощения и может стать причиной сильного ослабления монохроматического лазерного излучения. Это делает пригодной методику его детектирования, использующую закон Бугера.

Для спектрального анализа смеси газов заранее неизвестного состава необходимо задать примерный или характерный состав смеси, а также среднюю концентрацию её компонентов [13]. Поскольку уширение линий определяется составом смеси, температурой и давлением, для идентификации участков спектра (например, линий), т.е. для установления однозначного соответствия между тем или иным участком спектра смеси и конкретным компонентом смеси необходимо сформировать набор спектров компонент, уширенных так же, как и в составе смеси.

Для моделирования спектров поглощения используется программный комплекс SPECTRA [14], в котором были сформированы смеси двух видов: рабочая смесь, и набор i смесей для каждого из нужных компонент. В свою очередь, i -я смесь состоит из двух компонент: газ, концентрацию которого необходимо определить и разбавитель – любой газ, который имеет практически нулевое сечение поглощения во всем ближнем ИК-диапазоне (то есть поглощает в данном диапазоне существенно лучше основного компонента). Так как рабочая смесь состоит из n компонент, были сформированы n двухкомпонентных смесей, в каждой из которых присутствует i -й компонент и разбавитель, причем i -й компонент присутствует в концентрации, равной его концентрации в рабочей смеси.

В качестве разбавителя был выбран азот. Объёмная доля метана находилась по значению предельной допустимой концентрации (ПДК), и была выбрана 0,1 от ПДК (по ГОСТ 12.1.007-76). Объёмная доля воды вычислялась на основании влажности воздуха. Таким образом, первая смесь – рабочая смесь (CH_4 , N_2 , H_2O , CO_2); вторая смесь – смесь, состоящая из воды (H_2O) и разбавителя (N_2); третья смесь – смесь, состоящая из метана (CH_4) и разбавителя (N_2).

После определения смесей можно вычислить спектры сечения поглощения. Для вычисления спектров необходимо знать ряд параметров, основные из которых: температура – соответствует нормальным условиям в средней полосе летом (296 K); давление – соответствует рабочим условиям (1 атм.); шаг вычислений – разрешение спектров выбиралось таким образом, чтобы на ширине контура типичной линии укладывалось достаточно много точек (выбран шаг 0,01 см); диапазон волновых чисел, в котором вычисляется спектр, равен $4000\text{--}8333\text{ см}^{-1}$, что соответствует длинам волн порядка 1.2 – 2.5 мкм; форма контура отдельной линии – контур Фойгта, который одновременно учитывает действие доплеровского (контур Гаусса) и столкновительного уширения (контур Лоренца) спектральной линии [15, 16].

На рис. 1 показан интерфейс диалогового окна программы SPECTRA. На основании данных, вычисленных системой, строятся графики спектров сечения поглощения (рис. 2). Чтобы выявить в спектре пики поглощения исключительно анализируемого вещества, были построены и наложены друг на друга два графика: сечение поглощения CH_4 , разбавленного N_2 и сечение поглощения смеси воды H_2O с азотом (рис. 2). Азот был выбран в качестве разбавителя, вызывающего уширение линий, но не имеющего поглощения в диапазоне поглощения анализируемого газа CH_4 . При наложении графиков, можно увидеть поглощение метана на длинах волн, где влияние других газов отсутствует или незначительно. Пик для воды находится в области 6054 1/см , что соответствует длине волны 1652 нм, пик для метана располагается в области $6055,3\text{ 1/см}$, что соответствует длине волны 1651 нм. По полученным значениям, можно сделать вывод, что лазер должен работать в области длин волн около 1651 нм (так же учтено, что поглощение воды минимально, и им пренебрегли) [16]. Исходя из рисунка, было получено сечение поглощения метана σ , соответствующее волновому числу и длине волны (табл. 1).

Моделирование спектра для выбранной смеси газов

Смесь газов: Моделируемый спектр:

Параметры отбора спектральных линий

WN_{min}, см⁻¹ *: WN_{max}, см⁻¹ *: Отсечка по интенсивности (S_{cut}), см/мол *:

Параметры внешней среды

Температура (T), К *: Давление (P), атм *:

Параметры контура

Форма контура: Крыло (W), число полуширин: Шаг вычислений (WN_{step}), см⁻¹:

Параметры прибора

Апп.функ. (AF):

Режимы моделирования

Записать:

Поля, помеченные "*", должны быть заполнены.

Рис. 1. Интерфейс диалогового окна программы SPECTRA

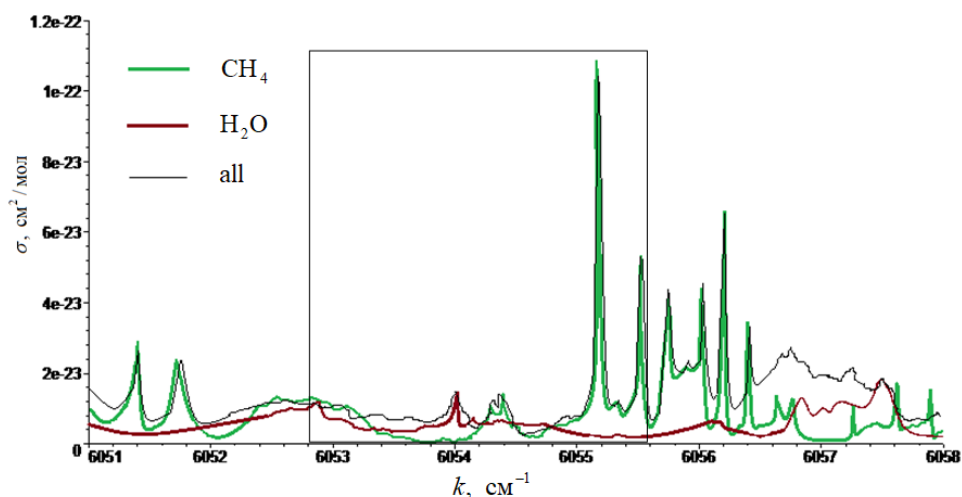


Рис. 2. График зависимости сечения поглощения от волнового числа с указанием диапазона перестройки

Таблица 1. Сечение поглощения метана и соответствующая ему длина волны

Газ	σ , см ² /мол	k , см ⁻¹	λ , нм
CH ₄	$1,05 \cdot 10^{-22}$	6055,3	1651

Сравнение спектра рабочей смеси с каждым из n спектров разбавленной смеси показало, что спектр сечения поглощения рабочей смеси формируется поглощением только i -го компонента.

Моделирование параметров для обоснования выбора компонентов системы.

1. Выбор лазера. Полученные спектральные характеристики метана, в частности, значение длины волны 1651 нм, необходимы для определения значений лазера, который оптимальным образом подходит для детектирования метана. Однако, помимо длины волны излучения и ширины спектральной линии, необходимо принять во внимание и другие критерии выбора источника излучения, к которым относятся диапазон перестройки по длине волны, КПД, массогабаритные характеристики. Диапазон перестройки лазера может ограничить выбранные ранее интервалы, для идентификации компонентов газовой смеси.

В качестве источника излучения были рассмотрены полупроводниковые лазеры, поскольку они обладают сравнительно высоким КПД и малыми массогабаритными характеристиками. В ИК-диапазоне преобладают лазеры с распределённой обратной связью (DFB-лазеры) с широким диапазоном выбора длин волн. Достоинством лазеров является простота реализации. Также для них характерна узкая полоса спектральной линии, невысокая выходная мощность, стабильная перестройка по току и температуре, маленькие размеры.

На основании моделирования характеристик перестройки по току, длине волны и других, можно получить, что подходящим лазером является DFB-лазер Nolatechs с рабочей длиной волны 1651 нм. Его технические характеристики приведены в табл. 2.

Таблица 2. Технические характеристики лазера

Параметр, ед. имз.	Обозначение	Значение
Номинальная выходная мощность, мВт	P_{out}	10
Рабочее напряжение, В	U	2
Максимальный ток, мА	I_{max}	60
Пороговый ток, мА	I_{min}	20
Ширина спектральной линии, МГц	Δf	5
Перестройка по току, нм/мА	Δ_I	0,02
Диапазон рабочих температур, °С	$T_{min} \dots T_{max}$	–40 .. +70

2. Оценка перестройки лазера и параметров фиксации измерений. Определим диапазон перестройки лазера для корректировки по спектру для детектирования метана. Для этого, используя выражение для перестройки лазера по току в соответствие с зависимостью изменения спектрального положения моды, преимущественной в интервале токов [17]:

$$\Delta \tilde{\lambda} = \Delta_I (I_{max} - I_{min}). \quad (2)$$

Подставив в (2) числовые значения параметров из табл. 2, получим, что $\Delta \tilde{\lambda} = 0,8$ нм. Тогда, воспользовавшись соотношением $\Delta \tilde{\lambda} / \lambda = \Delta k / k$ [17], можно получить диапазон перестройки лазера по току при длине волны 1651 нм (см. табл. 1) в пространстве волновых чисел: $\Delta k = 2,93$ 1/см. Это значение на спектре (рис. 2), отсчитанное в обе стороны от волнового числа спектрального пика метана 6055,3 1/см, дает диапазон, полностью охватывающий основные полосы спектра детектируемого вещества, что свидетельствует о правильности выбора источника лазерного излучения.

Оценим теперь время прохождения излучения для определения времени перестройки лазера с помощью соотношения [18]:

$$t_L = 2L / c, \quad (3)$$

где L – расстояние до объекта, м; c – скорость света, м/с. Приняв расстояние до объекта 100 м, из (3) получается время прохождения излучения $0,33 \cdot 10^{-6}$ с. Это значение используется для определения времени перестройки лазера в течение одного периода в предположении, что модулированный сигнал не будет смещаться от первоначального более, чем на 0,1%: $T_{mod} = t_L / 0,1\% = 0,33$ мс. Следовательно, частота модуляции пилообразного сигнала будет $F_{mod} = 1 / T_{mod} = 3$ кГц.

Это значение используется для оценки теоретического расстояния между измерениями: $l_t = V / F_{mod}$, где V – скорость БПЛА, на котором установлен лазерный детекторный комплекс.

Зная скорость БПЛА, можно определить, с какой точностью в пространстве можно обнаружить метан (то есть, через какое расстояние будут происходить отсчёты). Приняв значение скорости БПЛА равным 100 км/ч (27,8 м/с), получается теоретическое значение при одном измерении без усреднений 0,009 м. В области может быть всплеск шума, который система воспримет за концентрацию метана, поэтому берется не одно такое измерение, а 100 и их усредняют между собой. Если при повторных измерениях в одном и том же месте присутствует пик, то можно считать, что в этом месте присутствует утечка метана, а не случайный шум. В реальных измерениях количество усреднений принимается равным $N=100$ (что означает случайной ошибки в 10 раз). Следовательно, частота сканирования ν в секунду $\nu=F_{\text{mod}}/N=30$ отсчетов. Отсюда дистанция сканирования каждого импульса, то есть фактическое значение расстояния между измерениями, оценивается как $l_r=V/\nu=0,93$ м.

3. Оценка погрешности измерения концентрации. Из (1) можно получить оценку погрешности измерения концентрации i -ого компонента смеси при изменении мощности лазерного излучения на величину ΔP . Для это из (1) можно записать:

$$n_i + \Delta n_i = -\frac{1}{L\sigma_i} \ln \frac{P + \Delta P}{qP_0}. \quad (4)$$

Из (4) после преобразований можно получить:

$$\Delta n_i = -\frac{1}{L\sigma_i} \ln \left(1 + \frac{\Delta P}{P} \right). \quad (5)$$

Если учесть, что $L\sigma_i n_i \ll 1$, то в основном приближении в (5) можно положить $P \approx qP_0$. Далее, учитывая, что $\Delta P/qP_0 \ll 1$ из (5) после преобразований можно получить оценку абсолютного значения погрешности:

$$|\Delta n_i| \approx \frac{1}{L\sigma_i} \frac{\Delta P}{qP_0}. \quad (6)$$

Если воспользоваться связью эквивалентной мощность шума NEP и ширина полосы пропускания детектора B с изменением мощности детектора (7) [19]:

$$\Delta P = NEP \sqrt{B}, \quad (7)$$

то (6) примет вид:

$$|\Delta n_i| \approx \frac{1}{L\sigma_i} \frac{NEP \sqrt{B}}{qP_0}. \quad (8)$$

Выражение (8) связывает абсолютное значение погрешности измерения концентрации компонента газовой смеси с характеристиками приемника.

Отметим, что, если сигнал оцифровывается по $M=10000$ точкам, то ширина полосы пропускания $B=MF_{\text{mod}}=30$ МГц.

4. Оценка диапазона измеряемых концентраций, сечения рассеяния и поглощения. Рассчитаем минимальную концентрацию метана ($i=\text{CH}_4$), которую необходимо измерить. Сначала следует определить максимальную концентрацию метана: $n_{\text{CH}_4\text{max}}=n \cdot \varphi_{\text{CH}_4}$, где n – концентрация молекул газа, φ_{CH_4} – значение объемной доли, подбираемое из ПДК (ГОСТ 12.1.007-76), а точнее, пред ПДК: $\varphi_{\text{CH}_4}=0,104$. Тогда, воспользовавшись уравнением состояния идеального газа $p=nk_B T$, где p – давление газа,

T – его температура, k_B – константа Больцмана, можно оценить максимальную концентрацию метана при выбранных атмосферных условиях: $n_{CH_4}=26,1 \cdot 10^{17}$ мол/см³. Тогда интересующая нас минимальная измеримая концентрация может быть оценена значением $n_{CH_4min}=n_{CH_4max} \cdot 10^{-3}=26,1 \cdot 10^{14}$ мол/см³.

Пропускание излучения за счет рассеяния на частицах пыли в атмосфере есть:

$$\tau_a = \exp(-2\alpha L), \quad (9)$$

где α – коэффициент пропускания, который для заданной длине волны (табл.1) может быть принят $\alpha=0,002$ 1/м. Тогда из (9) получается значение $\tau_a=0,81$.

Коэффициент поглощения q , учитывающий дефекты системы, может быть оценен по формуле:

$$q = \exp(-Ln_d\sigma_d), \quad (10)$$

где n_d – концентрация пылевых частиц, σ_d – их сечение рассеивания. В предположении сферической формы пылевых частиц, можно считать, что $\sigma_d=\pi d^2/4$, d – диаметр частицы. Тогда масса одной частицы есть $m=\rho \cdot \pi d^3/6$, где ρ – плотность частицы, в наших условиях может быть принята равной 2000 кг/м³. Приняв значение диаметра частицы порядка 5 мкм, можно получить оценки $\sigma_d \approx 19,7$ мкм² и $m \approx 13 \cdot 10^{-10}$ кг. Поскольку нормативные в современных условиях выбросы пыли составляют примерно до 10 мг/м³ (разовая ПДК РМ2.5 - 0,16 мг/м³ [20], ГОСТ Р 56929-2016), то нормативное оценочное значение концентрации пылевых частиц $n_d \approx 10$ [мг/м³]/м [мг] (ГОСТ Р 70230-2022). С учетом этих значений, оценка коэффициента поглощения по формуле (10) дает величину $q=0,997$.

5. Оценка энергетических характеристик для выбора приемника. Вследствие наличия модуляции (0,75%) реальная выходная мощность ослабляется, поскольку связана с номинальной $P_0=P_{out}0.75\%$, и составит в соответствии с характеристиками выбранного лазера (табл. 2) 7,5 мВт.

Воспользуемся соотношением $|\Delta n_{CH_4}|/n_{CH_4min} = \tau_a / SNR$, где SNR – отношение сигнал/шум [21], и оценкой погрешности (8), получим эквивалентную мощность шума:

$$NEP \approx \frac{L \sigma_{CH_4min} n_{CH_4min} \tau_a q P_0}{SNR \sqrt{B}}. \quad (11)$$

С учетом рассчитанных выше значений параметров, оценка эквивалентной мощности шума для длины волны метана (табл. 1) по формуле (11) дает величину $NEP \approx 3 \cdot 10^{-14}$ Вт/Гц^{1/2}.

По полученным значениям NEP , с учётом спектрального диапазона и мощности DFB-лазера был выбран приёмник излучения Ge фотодиод (Thorlabs). Его технические характеристики приведены в табл. 3.

Таблица 3. Технические характеристики Ge фотодиода (Thorlabs)

Параметр, ед. имз.	Значение
Спектральный диапазон, мкм	0,8 .. 1,8
Длина волны пиковой чувствительности, мкм	1,55
Обнаружительная способность, см·Гц ^{1/2} /Вт	5·10 ¹²
NEP, Вт/Гц ^{1/2}	4·10 ⁻¹⁴
Прямой ток, мА	20
Минимальная чувствительность, А/Вт	0,22
Диапазон рабочих температур, °С	-40 .. +60

Модель прототипа детектора и его размещение на БПЛА. Для построения модели прототипа детектора была разработана функциональная схема (рис. 3). Излучение от источника – DFB-лазера (поз. 1) – проходит через линзу (поз. 2), увеличивающую диаметр лазерного пучка и через коллиматор (поз. 3), делающий пучок параллельным и направляется на облако исследуемого газа. Отражаясь от поверхности, лазерное излучение при помощи объектива (поз. 4) фокусируется и попадает в полевую диафрагму (поз. 5), расположенную непосредственно в фокусе объектива. Далее излучение, пройдя коллиматор (поз. 6), который делает излучение параллельным, направляется на фильтр (поз. 7), отсекающий излучение вне диапазона длины 1650 нм. Затем излучение при помощи линзы (поз. 8) фокусируется на приемник (поз. 9).

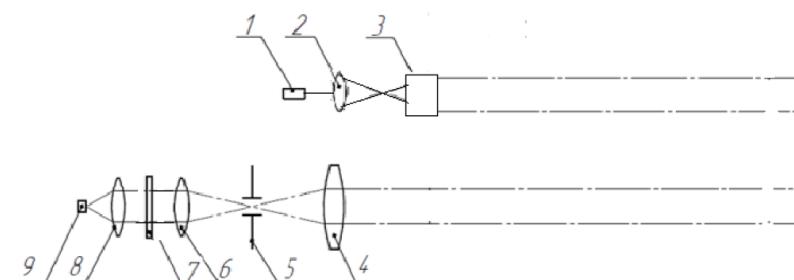


Рис. 3. Функциональная схема работы излучателя и приемника

Для прототипа были выбраны следующие оптические компоненты, используемые в схеме (рис. 3). В качестве фокусирующей линзы используется LA1401 – плоско-выпуклая линза с фокусным расстоянием 60 мм и диаметром 50,8 мм. Коллиматор подбирается исходя из диапазона длин волн и пучка на выходе. Для этого подходит коллиматор CFC-11X-C, работающий в диапазоне длин волн 1050-1620 нм с фокусным расстоянием 11 мм и диаметром на выходе 12,1 мм. Был подобран полосовой фильтр FB1650-12 с центральной длиной волны 1650 ± 2.4 нм и диаметром 21 мм. Исходя из габаритных размеров и диаметра падающего пучка излучения, для фокусировки на приёмник использовалась плоско-выпуклая линза LA1951 с диаметром 25,4 и таким же фокусным расстоянием.

Предлагается использовать детектор на мини БПЛА, вес которых от 10 до 50 кг, время пребывания в воздухе достигает 5 часов, высота полета варьируется от 3 до 5 километров.

Для размещения на мини БПЛА, был подобран корпус с габаритными размерами 150 мм x 150 мм x 71 мм, так как имеет вместимость, достаточную для данного механизма и обладает небольшими габаритами. В качестве мини БПЛА можно использовать модель BirdEye 500 со взлетной массой самолета 10 кг, размахом крыльев – 2 метра, а длиной – 1,3 метра.

Корпус выбранного датчика рекомендуется расположить на мини БПЛА таким образом, чтобы лазерный импульс, нацеленный на контролируемые объекты, такие как газопроводы или почва, частично отражался. Прибор улавливает этот отражённый сигнал и определяет уровень его поглощения. Затем полученные данные преобразуются в приборах, что позволяет вычислить концентрацию метана в анализируемом газовом слое. Подчеркнем, что данная работа посвящена проектированию только оптической (а именно: узла оптического детектирования) части прибора, а не его полной интеграции в измерительный комплекс. Модельная схема рекомендуемого крепления детектора приведена на рис. 4.

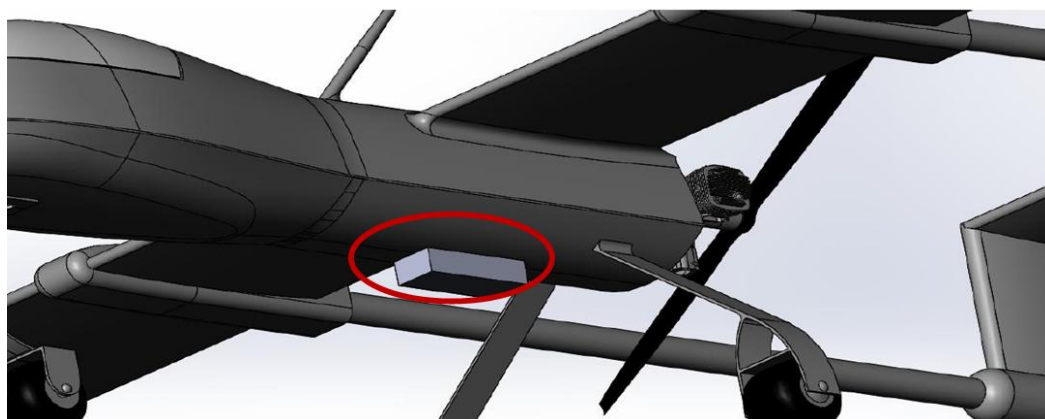


Рис. 4. Пример размещения детектора на мини БПЛА

Выводы. Таким образом, в работе был обоснован выбор элементной базы для разработки прототипа лазерного детектора метана с учетом планируемого размещения на БПЛА класса мини. Проведено моделирование спектров поглощения детектируемых веществ, на основе которого определены оптимальные диапазоны длин волн лазера. Предложена модель построения прибора, произведен расчет его технических характеристик и выполнен подбор компонентов системы.

В частности, на основании моделирования характеристик перестройки по току, длине волны и других установлено, что подходящим лазером является для детекторной системы DFB-лазер (Nolatehc) с рабочей длиной волны 1651 нм, а приемником излучения – Ge фотодиод (Thorlabs). Разработана функциональная схема лазерного детектора и подобраны ее оптические компоненты. Предложены модели использования разработанной системы лазерного детектирования метана на мини БПЛА с привязкой к его средней скорости, высоты полета и конструкционными особенностями.

Следует отметить, что разработанная модель прототипа детектора превосходит некоторые существующие модели. В частности, диапазон рабочих температур предложенного прототипа шире, чем лазерного детектора газа Laser Methane mini, причем расширение идет в низкотемпературный диапазон, что расширяет возможности применения разработанного прототипа в северных широтах с холодными климатическими условиями. Также расстояние измерений детектора Laser Methane mini ниже, чем у спроектированного, что требует более низких высот полета летального аппарата, на который устанавливается датчик, по сравнению с предложенной нами моделью. Другой детектор GasFinder-UAV OP-TDL, несмотря на возможность установки на БПЛА класса мини, требует более сложной схемы установки и предъявляет специализированные требования к корпусу БПЛА, в отличие от простого крепления разработанной нами модели.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Буковецкий, Н. А. Методы обнаружения утечек углеводородов / Н. А. Буковецкий // Теория и практика современной науки. – 2023. – № 6(96). – С. 47-60. – EDN GYUSPQ.
2. Aerial-based gas tomography – from single beams to complex gas distributions / P. Neuman [et al.] // European Journal of Remote Sensing. – 2019. – V. 52. – P. 1-15. – DOI 10.1080/22797254.2019.1640078.
3. Последние достижения в области обнаружения утечек в газопроводах / Р. В. Дудин, В. С. Дербичев, К. С. Роман [и др.] // Вестник евразийской науки. – 2020. – Т. 12, № 1. – С. 9. – EDN LWBMMX.
4. Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere / Editor Claus Weitkamp. – Berlin: Springer Science& Business, 2006. – 456 p.

5. Tassielli, G. Detection of Methane Leaks via a Drone-Based System for Sustainable Landfills and Oil and Gas Facilities: Effect of Different Variables on the Background-Noise Measurement / G. Tassielli, L. Canana, M. Spalatro // Sustainability. – 2024. – V. 16. – P. 7748. – URL: <https://doi.org/10.3390/su16177748>.
6. Fosco, D. Progress in monitoring methane emissions from landfills using drones: an overview of the last ten years / D. Fosco, M. De Molfetta, P. Renzulli, B. Notarnicola // Science of The Total Environment. – 2024. – V. 945. – P. 173981. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173981>.
7. Дистанционный лазерный детектор Laser Methane mini [Электронный ресурс]. – URL: https://www.pergam.ru/catalog/gas_leaks/gas/laser-methane-mini.htm (дата обращения 24.10.2024).
8. Газоанализатор Sniffer4D V2.0 для интеграции на БПЛА [Электронный ресурс]. – URL: <https://aeromotus.ru/product/gazoanalizator-sniffer4d-dlya-krepleniya-na-bpla/?ysclid=m2n2fin06i361966712> (дата обращения 24.10.2024).
9. Детекторы утечек газа для БПЛА [Электронный ресурс]. – URL: https://www.pergam.ru/catalog/gas_leaks/dls-bpla/ (дата обращения 25.07.2024).
10. Исследование возможности применения лазерной системы на основе параметрического генератора света для лидарного зондирования состава атмосферы / Г. Г. Матвиенко, О. А. Романовский, С. А. Садовников [и др.] // Оптический журнал. – 2017. – Т. 84, № 6. – С. 58-65. – EDN YQHQZV.
11. Оптимизация параметров газогенераторной и лидарной систем для измерения потоков воздуха при неразрушающем контроле качества охлаждающих микроканалов на малых расстояниях / А. А. Ким, К. В. Елисеев, В. В. Акапьев [и др.] // Письма в Журнал технической физики. – 2020. – Т. 46, № 9. – С. 20-24. – DOI 10.21883/PJTF.2020.09.49367.17977. – EDN YEGGXZ.
12. Еремин, В. В. Основы физической химии: учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 1. Теория / В. В. Еремин, С. И. Каргов, И. А. Успенская. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 320 с.
13. Применение параметрического генератора света для дистанционного мониторинга атмосферы в диапазоне спектра 3-4 мкм / О. А. Романовский, С. А. Садовников, А. Я. Суханов [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327, № 6. – С. 105-114. – EDN WGFBLJ.
14. Михайленко, С. Н. Информационно-вычислительная система "Спектроскопия атмосферных газов". Структура и основные функции / С. Н. Михайленко, Ю. Л. Бабилов, В. Ф. Головкин // Оптика атмосферы и океана. – 2005. – Т. 18, № 9. – С. 765-776. – EDN HRPJUV.
15. Лидарное зондирование малых газовых составляющих атмосферы методом дифференциального поглощения: результаты моделирования и экспериментов / Д. А. Бочковский, О. А. Романовский, О. В. Харченко, С. В. Яковлев // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325, № 2. – С. 127-136. – EDN SMXPGZ.
16. The HITRAN 2020 Molecular Spectroscopic Database / ByEliMlaver [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.aer.com/news-events/blog/the-hitran2020-molecular-spectroscopic-database/> (дата обращения 25.07.2024).
17. Лазерные измерительные системы / А. С. Батраков, М. М. Бутусов, Г. П. Гречка [и др.]. – М.: Радио и связь, 1981. – 456 с.
18. Климков, Ю. М. Лазерная техника: Учебное пособие / Ю. М. Климков, М. В. Хорошев. – М.: МИИГАиК, 2014. – 143 с.
19. Методика расчета волоконно-оптических систем передачи с распределенным доступом / А. О. Костромитин, О. И. Котов, Л. Б. Лиокумович, А. В. Соколов. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. – 84 с.
20. PM2.5 Explained. Indoor Air Hygiene Institute [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.indoorairhygiene.org/pm2-5-explained/> (дата обращения: 25.07.2024).
21. Физические основы полупроводниковой фотоэлектроники: учебное пособие / А. В. Войцеховский, И. И. Ижнин, В. П. Савчин, Н. М. Вакив. – Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2013. – 560 с.

Поступила в редакцию 28.02.2025 г., рекомендована к печати 17.03.2025 г.

SIMULATION OF A LASER METHANE LEAK DETECTION GAS ANALYZER SYSTEM USING MINI DRONS

Savotchenko S.E., Akapev V.L.

Investigation of the possibility of creating a model of a gas analyzer system for laser detection of methane leaks using mini unmanned aerial vehicles (UAVs) on a modern element base that allows leak detection at gas transportation infrastructure facilities in real time and safe conditions. The experimental technique consists in modeling the spectral characteristics of an air-methane gas mixture in order to develop a prototype laser gas analyzer operating in the optimal spectral range to determine the concentrations of its components. The choice of an element base for the development of a prototype of a laser methane detector is justified, taking into account the planned placement on UAVs of the mini class. The absorption spectra of the detected substances are modeled, on the basis of which the optimal wavelength ranges of the laser are determined. A model of the device construction is proposed, its technical characteristics are calculated and the system components are selected. The functional scheme of the laser detector has been developed and its optical components have been selected. The models of using the developed methane laser detection system on a mini UAV with reference to its average speed, altitude and design features are proposed.

Keywords: laser detector complex, substance detection, methane leak, gas analyzer, UAV, dron.

Савотченко Сергей Евгеньевич

доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры высшей математики и физики ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»,
Российская Федерация, г. Москва.
E-mail: savotchenkose@mgri.ru

Savotchenko Sergei Evgenevich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Professor at Department of High Mathematics and Physics Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting Russian Federation, Moscow.

Акапьев Виктор Львович

кандидат педагогических наук, доцент кафедры информационно-компьютерных технологий в деятельности органов внутренних дел ФГКОУ ВО «Белгородский юридический институт Министерства Российской Федерации имени И.Д. Путилина»,
Российская Федерация, г. Белгород.
E-mail: akapevv1@yandex.ru

Akapev Viktor Lvovich

Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor at Department of Information and Computer Technologies in the Activities of Internal Affairs Bodies of Belgorod Law Institute of the Ministry of the Russian Federation named after I.D. Putilin,
Russian Federation, Belgorod.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫБРОСОВ ОТ ТОЧЕЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ С ПОМОЩЬЮ ТЕРМОАНЕМОМЕТРА

© 2025 Пометун Е.Д.

Статья посвящена исследованию выбросов от точечных источников с использованием термоанемометра постоянной температуры. Приводится описание турбулентных струйных течений в приземном слое атмосферы, их структура и динамика. Результаты исследований подтверждают классические представления о развитии струй. Выполнено моделирование вертикального осесимметричного течения на лабораторной установке. Проведенные эксперименты позволяют углубить понимание тонкой структуры турбулентности и могут быть полезны для дальнейших исследований в области моделирования тепловых выбросов и аэродинамики.

Ключевые слова: термоанемометр постоянной температуры, экологический мониторинг, приземный слой атмосферы, изотермические течения.

Введение. Тепловой режим атмосферы играет ключевую роль в формировании климата Земли. Основным источником тепловой энергии на планете служит солнечная радиация, тогда как антропогенные выбросы вносят незначительный вклад в тепловой баланс атмосферы. Тем не менее, именно эти выбросы оказывают существенное влияние на условия жизнедеятельности человека. В связи с этим моделирование распространения тепловых выбросов в атмосфере представляет собой важную научную задачу. Совершенствование методов физического моделирования требует углубленного исследования фундаментальных закономерностей турбулентного переноса в неизотермических струйных течениях. Особый интерес представляет анализ тонкой структуры турбулентности, включая ее энергетические и структурные характеристики, которые определяют особенности тепломассопереноса в приземном слое атмосферы [1-3].

Наиболее достоверные экспериментальные данные о тонкой структуре могут быть получены путем реализации однофакторного эксперимента. Проведение таких исследований возможно в лабораторных условиях при обеспечении изоляции изучаемых течений от внешних воздействий.

Основная часть. Атмосфера Земли, простирающаяся на сотни километров, имеет неравномерное распределение массы и тепловой энергии. Наибольшая концентрация воздушных масс (около 50%) сосредоточена в нижнем 5-километровом слое, тогда как до высоты 30 км содержится 99% атмосферного воздуха. Именно в этих слоях происходят ключевые процессы, определяющие условия жизнедеятельности биосферы и человеческой цивилизации.

Основным источником тепловой энергии для атмосферы служит солнечная радиация, тогда как вклад антропогенных выбросов в общий тепловой баланс не превышает нескольких процентов. Однако, несмотря на незначительную долю в энергетическом балансе, промышленные выбросы оказывают существенное влияние на локальные климатические условия и качество воздуха в приземном слое.

Работа выполнена в рамках молодежной лаборатории «Диагностика и механизмы адаптации природных и антропогенно-трансформированных экосистем Донбасса» (№ госрегистрации НИОКТР 1023110700153-4-1.6.19;1.6.11;1.6.12).

В результате взаимодействия земной поверхности с прилегающими воздушными массами формируются характерные температурные пограничные слои. Этот процесс обусловлен комплексным влиянием различных факторов, среди которых особую роль играет лучистая энергия, поступающая на земную поверхность, особенности растительного покрова и рельефа местности. Совокупность этих воздействий приводит к образованию в нижней части атмосферы специфического слоя с особым распределением температурных и скоростных характеристик воздушных потоков, известного в метеорологии как приземный пограничный слой атмосферы [4].

Отличительной чертой приземного пограничного слоя выступает взаимозависимость профилей метеорологических параметров, которые в стационарных условиях полностью определяются внешними воздействиями. К числу таких определяющих факторов относятся величина горизонтального градиента давления, интенсивность солнечной радиации, теплофизические свойства и степень шероховатости подстилающей поверхности. Важно отметить, что изменение любого из этих параметров вызывает трансформацию всей системы характеристик пограничного слоя.

В случаях, когда вертикальный температурный градиент в приземном слое атмосферы оказывается незначительным, появляется возможность лабораторного моделирования воздушных течений. Такое моделирование основывается на допущении о приблизительной однородности атмосферных условий, что позволяет существенно упростить постановку эксперимента при сохранении физической достоверности получаемых результатов. Этот подход особенно важен для изучения фундаментальных закономерностей формирования и развития пограничного слоя атмосферы.

Затопленные турбулентные струи представляют собой важный класс течений. Такие течения характеризуются сложной пространственной структурой и обладают рядом уникальных особенностей:

- истечение происходит в ограниченном пространстве,
- наблюдается взаимодействие со встречными или поперечными потоками,
- развивается характерная зона смешения с окружающей средой
- присутствуют четко выраженное ядро постоянной скорости, зона переходного течения и область развитой турбулентности [4].

Если температуры воздуха в струе и окружающей среде одинаковы, будет иметь место изотермическая затопленная струя. Важнейшей особенностью таких течений является сохранение постоянного статического давления во всем объеме струйного потока. Это свойство обусловлено спецификой взаимодействия струи с окружающей средой, что приводит к постепенному увеличению ее поперечных размеров (расширению) и систематическому изменению осевой скорости течения. Схема течения представлена на рисунке 1. Важной характеристикой распределения скоростей в струе (рис.1) является существенное преобладание продольной составляющей скорости над поперечными. В любом сечении струи компонента скорости (u), направленная вдоль оси течения x , значительно превышает по величине поперечные составляющие (v) по оси y . Это соотношение сохраняется на протяжении всей зоны развития струйного потока, что обусловлено преимущественно осесимметричным характером течения.

Подобное распределение скоростей позволяет в первом приближении рассматривать струю как течение с доминирующей продольной компонентой скорости, пренебрегая малыми поперечными составляющими. Такое допущение значительно упрощает математическое описание струйного течения, сохраняя при этом основные физические закономерности процесса.

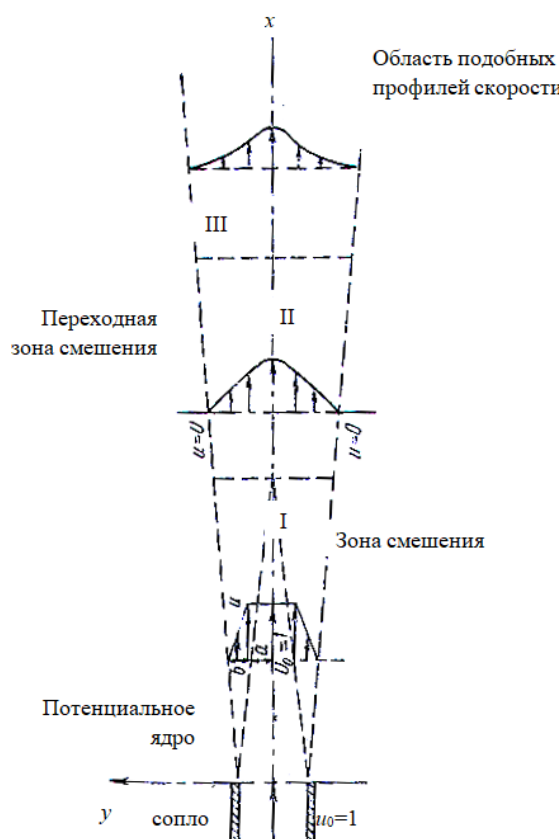


Рис. 1. Схема течения в затопленной струе [2]

Указанная особенность скоростного поля характерна для широкого класса струйных течений и подтверждается как экспериментальными исследованиями, так и результатами численного моделирования. При этом степень преобладания продольной скорости над поперечными составляющими может служить одним из критериев применимости упрощенных моделей для описания конкретного течения.

При нормировании скорости в точке измерения по максимальной скорости на оси трубы $\frac{u}{u_m}$ и координаты по расстоянию, на котором скорость равна половине

максимальной $\frac{y}{y_{0,5}}$, профили скорости становятся подобными. Эксперименты,

выполненные в [4], показали, что профили скорости и температуры аналогичны.

Восходящие струи образуются при выходе воздушных потоков, обладающих определенным начальным импульсом, в окружающую среду с отличающейся плотностью. Характерными примерами подобных течений служат выбросы нагретых газов из промышленных дымовых труб или выхлопные потоки охлаждающих систем энергетических установок. Динамика развития таких струй определяется сложным взаимодействием трех основных сил: инерции, выталкивающей (архимедовой) силы и вязкости. В зависимости от соотношения действующих сил, данные течения могут трансформироваться в два предельных случая. Когда начальный импульс потока становится пренебрежимо малым по сравнению с импульсом, создаваемым выталкивающей силой, течение приобретает характер свободного факела.

Такой режим характерен для сильно нагретых газов, где преобладают эффекты тепловой плавучести. С другой стороны, если влияние выталкивающей силы оказывается незначительным по сравнению с начальным импульсом истекающей струи, течение по своим характеристикам приближается к классической затопленной струе. В этом случае динамика потока определяется преимущественно инерционными силами и вязкостными эффектами.

Переход между этими предельными состояниями происходит плавно и зависит от конкретных физических параметров системы, включая разность плотностей, начальную скорость истечения и геометрические характеристики источника. Практическое значение изучения таких течений связано с их широким распространением в природных процессах и промышленных технологиях. Отношение между силами инерции, вязкости и плавучести определяется соответствующими числами подобия. Этими числами являются:

число Рейнольдса:

$$Re = \frac{u_0 D}{\nu},$$

где: u_0 - характерная скорость потока, D - характерный линейный размер, ν - кинематическая вязкость, и число Фруда :

$$Fr = \frac{u_0}{\left[gD \left(\frac{\rho_\infty - \rho_0}{\rho_0} \right) \right]^{1/2}},$$

где: g - ускорение свободного падения, $\frac{\rho_\infty - \rho_0}{\rho_0}$ - относительная разность плотностей.

При априорном предположении о турбулентном характере течения в струе, анализ может быть существенно упрощен путем введения критерия подобия - числа Фруда. Данный параметр изменяется в широких пределах, отражая баланс между инерционными силами и силами плавучести. В предельных случаях:

- 1) при $Fr \rightarrow 0$ течение приобретает характеристики свободного факела, где динамика полностью определяется архимедовыми силами;
- 2) при $Fr \rightarrow \infty$ течение соответствует классической затопленной струе, где эффектами плавучести можно пренебречь.

При развитии плавучих струй соотношение между этими силами изменяется на различных участках течения. На рис. 1 выделены три характерные зоны развития струи:

- 1) начальный участок. Он начинается непосредственно у среза трубы и продолжается до участка в струе, где скорость по оси начинает уменьшаться. В рассматриваемом случае динамика струи полностью подчиняется закономерностям, характерным для классической затопленной струи и силами плавучести можно пренебречь.

Течение на данном участке считается автомодельным и для поля относительных скоростей описывается соотношением:

$$\frac{u_c}{u_0} = 6,2 \left(\frac{\rho_0}{\rho_\infty} \right)^{-1/2} \left(\frac{x}{D} \right)^{-1},$$

- 2) Переходной участок. На данном участке происходит изменение течения. В данном случае динамика струи определяется сложным взаимодействием трех ключевых факторов: инерционных сил, силы вязкости и постепенно нарастающего влияния выталкивающей силы. При этом вклад силы плавучести возрастает от сечения к сечению вверх по потоку.
- 3) на третьем участке течение определяется силами плавучести – это зона автомодельного течения, которое для поля скорости описывается соотношением:

Характерным свойством изотермической струи является постоянство количества движения массы воздуха во всех сечениях струи. В условиях неизоатермической струи это свойство выполняется на начальном участке. Для круглой струи это условие записывается в виде:

$$U_m^2 x^2 \int_0^{r/x} \left(\frac{U}{U_m} \right)^2 \frac{y}{x} d \frac{y}{x} = const,$$

где U_m - скорость в центре данного сечения струи; x – расстояние от данного сечения до полюса струи; y - текущий радиус; r - радиус внешней границы рассматриваемого сечения.

Очень важным свойством круглой струи является зависимость скорости на оси струи от расстояния x в виде $U_m = \frac{const}{x}$ [2], т.е. обратная пропорциональность от расстояния. В условиях нашего течения эта зависимость выполняется на начальном участке.

Экспериментальные исследования осредненных значений полей скорости в вертикальной изотермической струе проводились на экспериментальной установке, разработанной на кафедре ФНПМЭ им. И.Л. Повха [5-9]. Внешний вид стенда приведен на рис. 2.



Рис. 2. Стенд для исследования вертикальной затопленной струи с положительной плавучестью

При планировании экспериментов была принята трехзонная схема развития струи, приведенная на рис.1. В качестве основного метода измерений был принят метод зондирования с помощью 8 мкм ниточного датчика термоанемометра постоянной температуры. Скорость перемещения измерительного преобразователя составляла 0,002 м/с. Частота опроса – 100 Гц [9]. Зондирование выполнялось на различных уровнях по оси x струи. Дискретность уровней составляла 0,05 м [5-7].

Измеренные профили скорости приведены на рисунке 3. Приведенные результаты соответствуют начальным условиям на срезе трубы по скорости 2,7 м/с по разности температур $\Delta T = T - T_{\infty} = 15,^{\circ}\text{C}$.

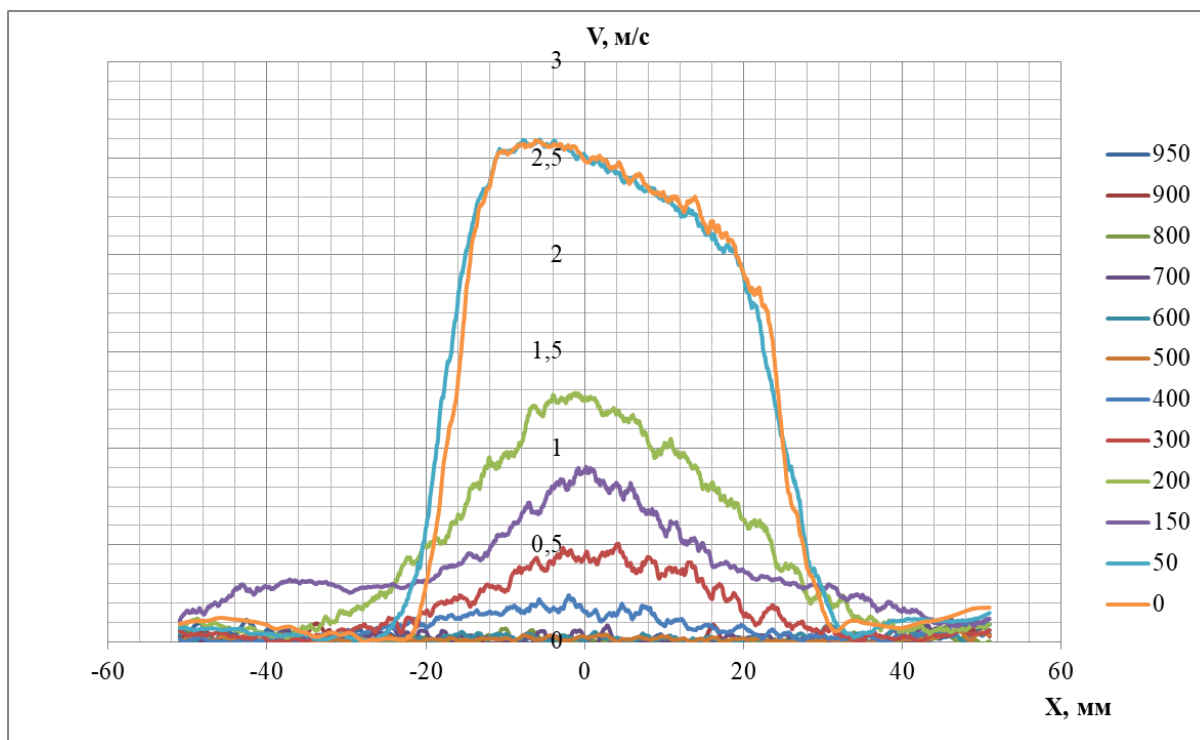


Рис. 3. Профили скорости в вертикальной изотермической струе

Экспериментальные результаты подтверждают классическое представление развития струи, указывающие на уменьшение осевой скорости и увеличение ее внешних размеров. Полученные результаты являются подтверждением правильности разработанной методики обработки сигналов, изложенной в [3].

Выводы. Проведенные предварительные исследования показали, что экспериментальная установка позволяет проводить измерения поля скорости в контролируемых условиях. Полученные экспериментальные результаты по развитию поля скорости коррелируют с данными приведенными в [2, 4] и могут быть использованы для исследования тонкой структуры турбулентности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Повх, И. Л. Техническая гидромеханика / И. Л. Повх. – 2-е изд; перераб и допол. – Л.: Машиностроение, 1976. – 504 с.
2. Теория турбулентности струй / Г. Н. Абрамович [и др.]; под общ. ред. Г. Н. Абрамовича. – М.: Наука, 1984. – 716 с.
3. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – 5-е изд; перераб. – М.: Наука, 1978. – 736 с.

4. Турбулентное смешение газовых струй / Г. Н. Абрамович [и др.]; под ред. Г. Н. Абрамович. – М.: Наука, 1974. – 272 с.
5. Разработка автономной автоматизированной системы непрерывного контроля состояния строительного объекта / В. Ю. Подлесный, В. И. Тимченко, И. А. Третьяков, В. В. Данилов // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 2. – С. 51-59. – EDN PNCERN.
6. Ярин, Л. П. Термоанемометрия газовых потоков / Л. П. Ярин, А. Л. Генкин, В. И. Кулес. – Л.: Машиностроение, 1983. – 198 с.
7. Пометун, Е. Д. Термоанемометрический метод измерения пульсаций скорости турбулентных потоков / Е. Д. Пометун // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 4. – С. 15-19. – EDN NBPFBG.
8. Пометун, Е. Д. Разработка автоматизированной системы научных исследований для аэродинамического эксперимента / Е. Д. Пометун, Р. А. Хрипунов, А. В. Васильева // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2020. – № 1. – С. 4-8. – EDN BAUJKR.
9. Основы информационно-измерительных технологий в АСУ и АСНИ / В. Ю. Подлесный, В. В. Данилов, И. А. Третьяков, Е. В. Колесник // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2024. – № 3. – С. 64-74. – DOI 10.5281/zenodo.14018604. – EDN SDSQAP.

Поступила в редакцию 18.03.2025 г., рекомендована к печати 10.04.2025 г.

INVESTIGATION OF EMISSIONS FROM POINT SOURCES USING A THERMOANEMOMETER

Pometun E.D.

The article is devoted to the study of emissions from point sources using a constant temperature thermoanemometer. The description of turbulent jet streams in the surface layer of the atmosphere, their structure and dynamics is given. The research results confirm the classical ideas about the development of jets. A simulation of vertical axisymmetric flow on a laboratory installation has been performed. The experiments carried out make it possible to deepen the understanding of the fine structure of turbulence and may be useful for further research in the field of modeling thermal emissions and aerodynamics.

Keywords: constant temperature thermoanemometer, environmental monitoring, surface layer of the atmosphere, isothermal currents.

Пометун Екатерина Дмитриевна

кандидат технических наук, доцент кафедры физики неравновесных процессов, метрологии и экологии им. И.Л. Повха ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: e.pometun.fnpme@mail.ru

Pometun Ekaterina Dmitrievna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Physics of Nonequilibrium Processes, Metrology and Ecology named after I.L. Povkh of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

EDN VTVRZV
УДК 004.932.72

DOI 10.5281/zenodo.15585989

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ РУКОПИСНОГО ТЕКСТА

© 2025 *Бондаренко В.И., Федоров М.Д.*

Проведен сравнительный анализ четырёх методов глубокого обучения (CNN, LSTM, Transformer, MLP) для распознавания рукописного текста. Проведено обучение и оценка моделей на наборах данных MNIST, EMNIST, IAM и RIMES. Результаты показывают, что CNN достигает наивысшей точности (99.04% на MNIST) и минимальных потерь, делая её наиболее эффективной для данной задачи. Предлагаются рекомендации по дальнейшему развитию моделей распознавания.

Ключевые слова: распознавание рукописного текста, глубокое обучение, CNN, LSTM, Transformer, MLP, MNIST, EMNIST, IAM, RIMES.

Введение. Распознавание рукописного текста является одной из ключевых задач в области искусственного интеллекта и компьютерного зрения. Несмотря на значительные успехи в распознавании печатного текста, проблема распознавания рукописного текста остаётся сложной из-за его высокой вариативности и сложности [1]. Существуют индивидуальные особенности почерка, различия в форме и наклоне букв, а также шумы, возникающие при сканировании, которые затрудняют разработку универсальных систем распознавания. Традиционные методы, основанные на алгоритмах машинного обучения, полагаются на ручное извлечение признаков и требуют значительной предварительной обработки данных. Эти подходы эффективны лишь в ограниченных сценариях, где текст стандартизирован, однако они часто не справляются с более сложными и вариативными данными.

Последние исследования в области глубокого обучения предлагают новые решения для распознавания рукописного текста. Сверточные нейронные сети (CNN) продемонстрировали высокую эффективность в задачах обработки изображений, позволяя автоматически выделять иерархические признаки в данных [2, 3]. Рекуррентные нейронные сети LSTM зарекомендовали себя как один из наиболее эффективных подходов к распознаванию рукописного текста в автономном режиме благодаря их способности обрабатывать последовательности символов с учетом контекста. Архитектура трансформеров, изначально предложенная для задач обработки естественного языка, также находит применение в задачах распознавания рукописного текста, особенно в обработке последовательностей и контекстов. Многослойные перцептроны (MLP) используются как базовый метод глубокого обучения для классификации изображений, однако они менее приспособлены для выявления пространственных и последовательных признаков.

Несмотря на разнообразие предложенных подходов, остаётся открытым вопрос о том, какой алгоритм наиболее эффективен для распознавания рукописного текста на разных типах данных. Большинство существующих исследований фокусируются на применении одного алгоритма к конкретному набору данных, что затрудняет всестороннее сравнение их эффективности.

Более того, многие из этих работ не дают ясных рекомендаций относительно выбора алгоритма для определённых условий или типов данных, что создаёт пробел в понимании эффективности различных методов в реальных задачах распознавания.

Целью данной работы является проведение сравнительного анализа четырёх современных методов глубокого обучения (CNN, LSTM, Transformer, MLP) на четырёх разных наборах данных: MNIST, EMNIST, IAM и RIMES. Эти наборы данных различаются по сложности и структуре, представляя различные аспекты проблемы распознавания рукописного текста. Проведение такого анализа позволит выявить сильные и слабые стороны каждого метода, определить оптимальные подходы для конкретных типов данных и предложить рекомендации по применению глубокого обучения в задачах распознавания рукописного текста.

Для достижения этой цели необходимо:

- детально исследовать архитектурные особенности и возможности каждого из четырёх алгоритмов глубокого обучения в контексте задачи распознавания рукописного текста;
- провести подготовку и предварительную обработку данных для повышения эффективности обучения;
- обучить и оценить каждую модель на каждом из выбранных наборов данных с использованием метрик точности и потерь;
- провести сравнительный анализ результатов для выявления наиболее эффективного алгоритма для различных типов данных.

Принципы работы алгоритмов. Свёрточные нейронные сети (CNN) – это тип глубоких нейронных сетей, предназначенных для работы с изображениями и данными с сетчатой топологией. Основной принцип работы CNN заключается в использовании свёрточных слоёв, которые автоматически извлекают ключевые признаки из изображения, такие как края, текстуры и формы [2, 3]. Сеть применяет небольшие фильтры, которые скользят по изображению, выполняя операцию свёртки и создавая карты признаков, отражающие различные аспекты входных данных. После этого применяются операции пулинга, уменьшающие размерность данных и повышающие устойчивость к смещениям и искажениям. Наконец, сжатые признаки передаются в полносвязные слои для классификации. Эта архитектура делает CNN эффективными для распознавания образов, включая задачи распознавания рукописного текста, поскольку они способны улавливать пространственные и иерархические структуры в данных.

Рекуррентные сети с долгой кратковременной памятью (LSTM) – это тип рекуррентных нейронных сетей (RNN), специально разработанный для работы с последовательными данными, такими как текст или временные ряды. Принцип работы LSTM заключается в использовании ячеек памяти, которые способны сохранять и передавать информацию на протяжении длительных последовательностей, благодаря механизму управляемых гейтов. Эти гейты (входной, забывающий и выходной) контролируют поток информации, решая, какая информация должна быть сохранена, забыта или передана дальше [4]. Это позволяет LSTM улавливать долгосрочные зависимости в данных и эффективно работать с последовательностями, где контекст играет важную роль. В задачах распознавания рукописного текста LSTM помогает учитывать взаимосвязи между символами, улучшая точность распознавания сложных и неоднозначных последовательностей.

Трансформеры (Transformers) – это архитектура нейронных сетей, разработанная для эффективной обработки последовательных данных, таких как текст. В отличие от рекуррентных сетей, трансформеры обрабатывают всю последовательность одновременно, используя механизм внимания (attention), чтобы определить, какие части данных наиболее важны для текущего шага [5, 6]. Механизм внимания позволяет модели фокусироваться на разных частях входных данных, независимо от их положения в последовательности, улавливая как локальные, так и глобальные зависимости. Архитектура трансформера состоит из многократно повторяемых слоёв энкодера и декодера, которые обрабатывают и преобразуют входные данные. Это позволяет трансформерам эффективно распознавать сложные паттерны и взаимосвязи, делая их особенно полезными для задач, где контекст всей последовательности важен, например, для распознавания рукописного текста с учетом контекста и структуры.

Многослойный перцептрон (MLP) – это базовая архитектура нейронных сетей, состоящая из входного, одного или нескольких скрытых и выходного слоёв. Каждый слой состоит из нейронов, которые связаны с нейронами предыдущего слоя, создавая полносвязную структуру. Принцип работы MLP заключается в том, что входные данные проходят через эти слои, где на каждом шаге к ним применяются линейные преобразования, а затем функции активации, такие как ReLU или сигмоида, чтобы внести нелинейность в модель [7]. Это позволяет MLP учить сложные зависимости в данных. Несмотря на свою простоту, MLP эффективен в задачах классификации и распознавания, однако он не так хорош в извлечении пространственных или последовательных признаков, как CNN или LSTM. В контексте распознавания рукописного текста MLP может использоваться для классификации отдельных символов, но его эффективность снижается на более сложных задачах, требующих учета контекста или пространственных особенностей.

Для данной работы будут использованы четыре основных набора данных для распознавания рукописного текста: MNIST, EMNIST, IAM и RIMES. Каждый из них обладает уникальными характеристиками и предоставляет различные уровни сложности для задач распознавания. Детальное описание каждого набора данных представлено ниже.

Подготовка наборов данных. Для подготовки данных MNIST, содержащих 60,000 изображений рукописных цифр для обучения и 10,000 изображений для тестирования, были использованы файлы в формате IDX, сжатые в формате gzip (рис. 1).

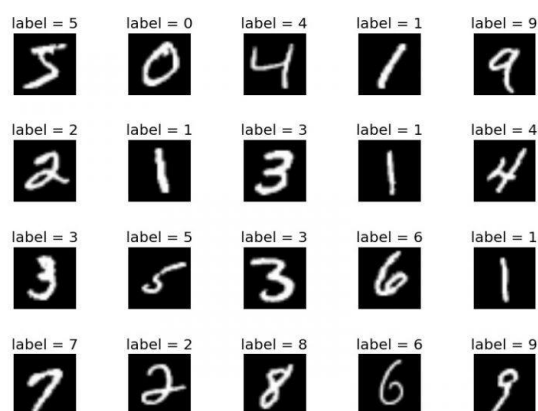


Рис. 1. Рукописные цифры из датасета MNIST

Сначала данные были загружены с использованием функций, которые читали изображения и метки из соответствующих файлов. Изображения были преобразованы в массивы NumPy и нормализованы путём деления на 255, чтобы все значения пикселей находились в диапазоне от 0 до 1. Такая нормализация помогает улучшить производительность моделей глубокого обучения, делая процесс обучения более стабильным. Метки были закодированы с использованием one-hot-кодирования, что представляет каждую цифру в виде вектора, где активен только один элемент, соответствующий правильному классу. После обработки обучающая выборка имела форму (60000,28,28,1), а тестовая – (10000,28,28,1). Дополнительное измерение размера 1 в конце формы используется для обозначения канала изображения, что необходимо для свёрточных нейронных сетей, которые ожидают входные данные в виде четырёхмерных тензоров.

Набор данных EMNIST представляет собой расширение MNIST, включающее как цифры, так и буквы английского алфавита (рис. 2).

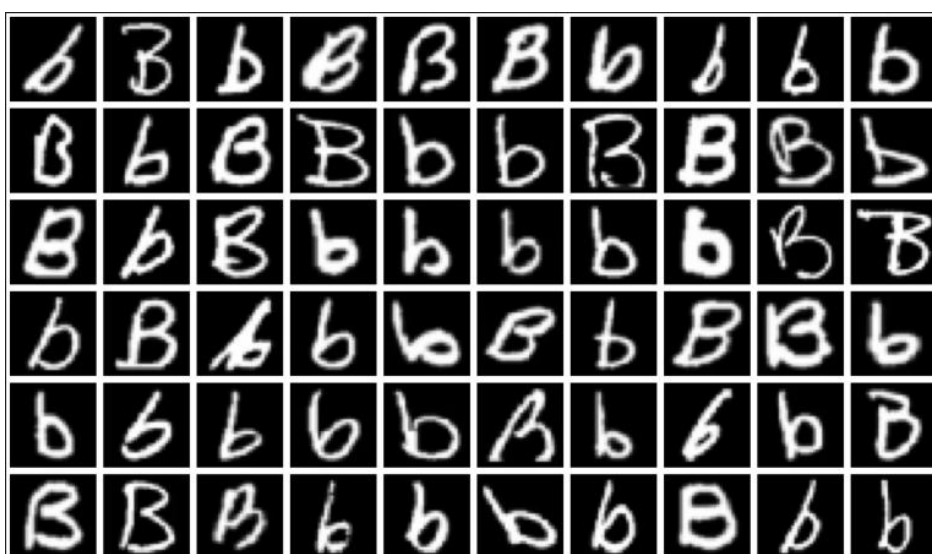
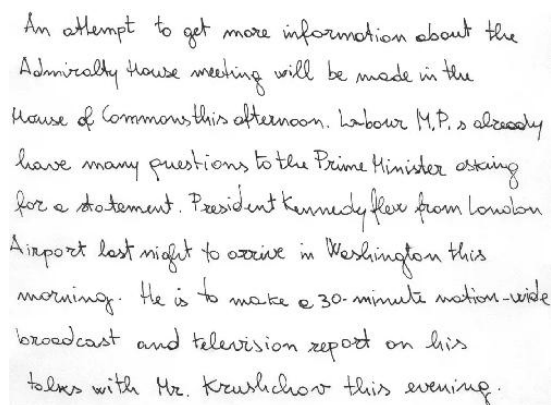


Рис. 2. Рукописные буквы b из датасета EMNIST

Он содержит 47 классов символов и используется для более сложных задач классификации [8]. Для подготовки данных EMNIST изображения и метки были загружены из сжатых IDX-файлов с помощью функций, аналогичных тем, что были использованы для MNIST. Изображения имели размер 28x28 пикселей, как и в случае MNIST, и были нормализованы путём деления на 255, чтобы значения пикселей находились в диапазоне от 0 до 1. После нормализации изображения были преобразованы в формат, совместимый с свёрточными нейронными сетями, путём добавления дополнительного измерения, что привело к форме (num_samples,28,28,1). Метки были также преобразованы в формат one-hot-кодирования для 47 классов, что позволяет моделям эффективно работать с ними. Обработанные данные имели формы (num_samples,28,28,1) для изображений и (num_samples,47) для меток.

Для набора данных IAM, который представляет собой сложный и реалистичный набор рукописных текстов, процесс подготовки данных был несколько сложнее. Изображения IAM содержат слова, строки и целые абзацы рукописного текста различного размера (рис. 3), поэтому они были предварительно обработаны для приведения к единому формату, подходящему для обучения моделей глубокого обучения.

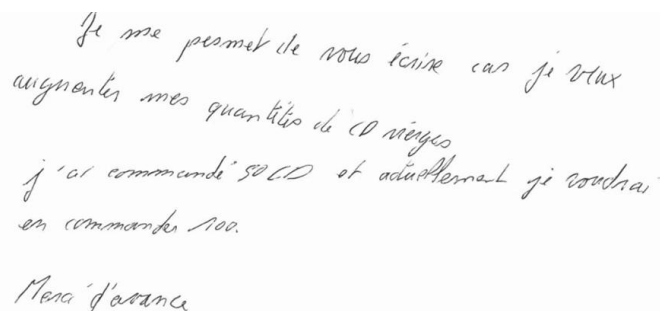


An attempt to get more information about the Admiralty House meeting will be made in the House of Commons this afternoon. Labour M.P.s already have many questions to the Prime Minister asking for a statement. President Kennedy flew from London Airport last night to arrive in Washington this morning. He is to make a 30-minute nation-wide broadcast and television report on his talks with Mr. Khrushchev this evening.

Рис. 3. Абзац рукописного текста из датасета IAM

Изображения были масштабированы и обрезаны до размера 128x32 пикселей для отдельных слов. Масштабирование выполнялось так, чтобы сохранить пропорции, а пустые области заполнялись нейтральным фоном (белым). После масштабирования изображения были нормализованы путём деления на 255, как и в предыдущих наборах данных. Метки в IAM представлены в виде строк текста, поэтому для их использования в нейронных сетях они были преобразованы в числовые последовательности (с помощью кодировщиков символов).

Набор данных RIMES, содержащий рукописные французские тексты, включает сложные рукописные документы, такие как письма и формы (рис. 4).



Je me permet de vous écrire car je veux
augmenter mes quantités de CD mages
j'ai commandé 50 CD et actuellement je souhaite
en commander 100.
Bonne nuit

Рис. 4. Письмо, написанное от руки на французском языке из датасета RIMES

Для подготовки данных RIMES изображения были предварительно обработаны для обеспечения единообразия и совместимости с моделями глубокого обучения. Изображения были масштабированы до фиксированного размера, 128x64 пикселей, чтобы обеспечить одинаковую размерность входных данных. Если изображение было больше целевого размера, оно обрезалось, а если меньше – дополнялось нейтральным фоном. Масштабированные изображения были нормализованы путём деления на 255. Метки в RIMES представлены в виде строк текста, поэтому они также были преобразованы в числовые последовательности, чтобы сделать их пригодными для использования в процессе обучения моделей.

Обучение моделей. Рассмотрим процесс обучения модели с использованием всех алгоритмов на наборе данных MNIST [9]. Обучение каждой модели проводится в течение 5 эпох. Во время каждой эпохи модели обучаются на обучающей выборке и оценивались на тестовой выборке, при этом отслеживались метрики точности и потери. В конце каждой эпохи была выведена текущая точность (ассигасу) и величина функции потерь (loss) как для обучающего, так и для тестового набора данных, что можно увидеть на рисунке 5.

Epoch 1/5
469/469 — 10s 19ms/step - accuracy: 0.7930 - loss: 0.6547 - val_accuracy: 0.9808 - val_loss: 0.0585
Epoch 2/5
469/469 — 8s 18ms/step - accuracy: 0.9702 - loss: 0.1036 - val_accuracy: 0.9869 - val_loss: 0.0387
Epoch 3/5
469/469 — 8s 17ms/step - accuracy: 0.9776 - loss: 0.0733 - val_accuracy: 0.9890 - val_loss: 0.0343
Epoch 4/5
469/469 — 8s 17ms/step - accuracy: 0.9822 - loss: 0.0594 - val_accuracy: 0.9901 - val_loss: 0.0315
Epoch 5/5
469/469 — 8s 17ms/step - accuracy: 0.9855 - loss: 0.0497 - val_accuracy: 0.9909 - val_loss: 0.0269

Рис. 5. Динамика обучения модели CNN по эпохам

Модель CNN обучалась на протяжении 5 эпох, показывая стремительное увеличение точности. В первой эпохе точность модели достигла 79.30% на обучающей выборке и 98.08% на тестовой выборке. К пятой эпохе точность модели на обучающей выборке возросла до 98.55%, а на тестовой – до 99.09%. Потери также существенно уменьшились с каждой эпохой, указывая на улучшение качества модели. Общая точность модели на тестовой выборке составила 99.09%, что свидетельствует о её высокой эффективности в распознавании рукописных цифр.

Общие точности моделей, полученные после 5 эпох обучения, распределились следующим образом: CNN достигла наивысшей точности – 99.04%, MLP также продемонстрировала высокую точность – 97.96%. Модель LSTM немного уступила, показав итоговую точность 97.44%. Модель Transformer, несмотря на заметное улучшение в ходе обучения, оказалась менее точной по сравнению с остальными алгоритмами, достигнув 95.72%.

На основе результатов обучения были построены матрицы ошибок (Confusion Matrices) для каждой модели. На рисунке 6 представлена матрица ошибок для CNN, которая демонстрирует, как модель классифицировала каждую цифру.

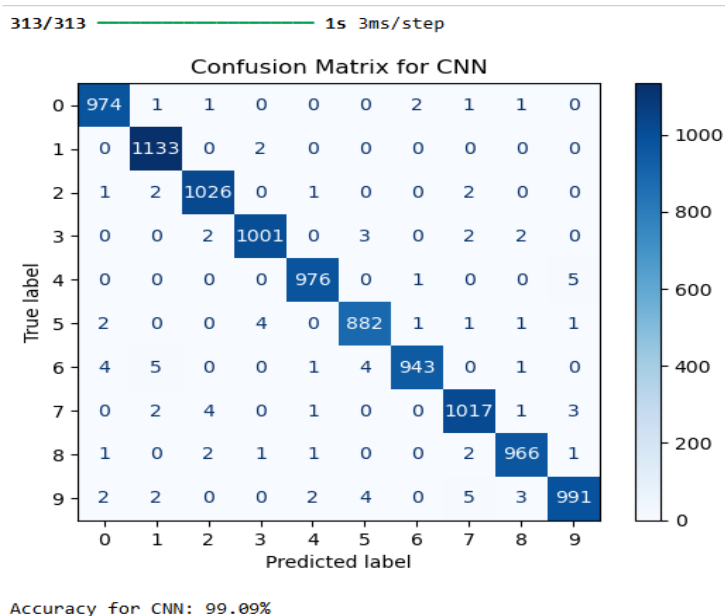


Рис. 6. Матрица ошибок для CNN

Большинство значений находятся на главной диагонали, что указывает на высокую точность классификации. Ошибки, хотя и редкие, указывают на случаи, когда модель спутала одну цифру с другой. Кроме того, были построены графики сравнения точности (рис. 7) и потерь всех моделей (рис. 8) за 5 эпох.

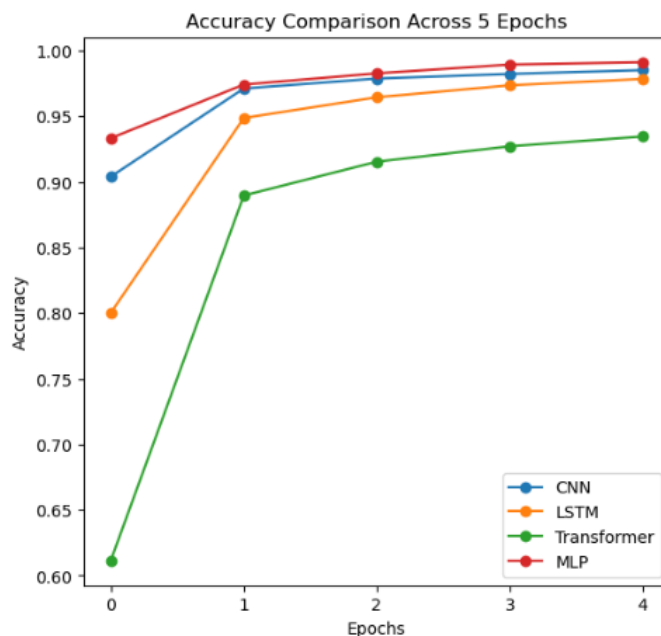


Рис. 7. Сравнение точности обучения различных алгоритмов за 5 эпох

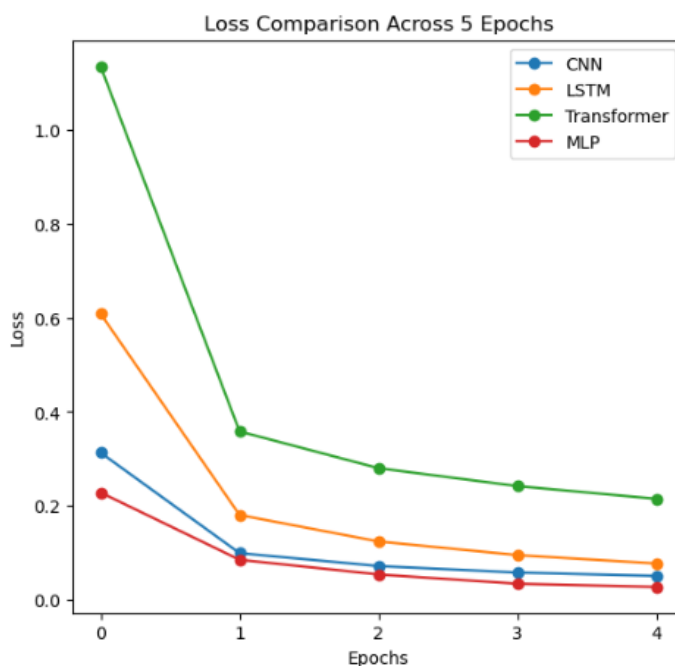


Рис. 8. Сравнение потерь обучения различных алгоритмов за 5 эпох

На графике точности видно, что CNN и MLP достигают наивысшей точности быстрее всех, в то время как LSTM следует за ними. Transformer показывает более медленный рост точности, но также достигает хороших результатов к пятой эпохе. График потерь демонстрирует аналогичную картину: потери уменьшаются быстрее всего у CNN и MLP, что свидетельствует о более эффективном обучении.

Таким образом, свёрточная нейронная сеть (CNN) продемонстрировала наилучшие результаты в распознавании рукописных цифр на наборе данных MNIST, достигнув точности 99.09%. Другие модели, такие как LSTM, Transformer и MLP, также показали хорошие результаты, однако уступили CNN в данной задаче.

Аналогичным образом были обучены и протестированы модели на наборах данных EMNIST, IAM и RIMES для всесторонней оценки эффективности каждого алгоритма в различных сценариях распознавания рукописного текста.

В таблице 1 представлено сравнительное измерение точности и потерь для каждой модели на различных наборах данных, при этом процесс обучения и оценки производился на локальной машине с использованием CPU Intel Core i7 6700K и 16GB RAM.

Таблица 1. Сравнение точности и потерь алгоритмов на наборах данных

Алгоритм	Набор данных	Точность (%)	Потери (%)
CNN	MNIST	99.04	2.69
	EMNIST	86.87	2.82
	IAM	85.34	4.81
	RIMES	87.81	4.06
LSTM	MNIST	97.44	3.52
	EMNIST	84.76	8.52
	IAM	81.57	9.12
	RIMES	83.08	8.52
Transformer	MNIST	95.72	4.23
	EMNIST	83.56	12.91
	IAM	79.46	10.18
	RIMES	81.49	9.51
MLP	MNIST	97.96	3.87
	EMNIST	84.23	7.14
	IAM	75.89	10.67
	RIMES	79.27	9.75

Выводы. Результаты сравнительного анализа четырёх алгоритмов глубокого обучения (CNN, LSTM, Transformer и MLP) на различных наборах данных (MNIST, EMNIST, IAM, RIMES) демонстрируют, что наиболее эффективно в задаче распознавания рукописного текста выступает свёрточная нейронная сеть (CNN). На всех четырёх наборах данных CNN достигает наивысшей точности, особенно выделяясь на наборе данных MNIST с точностью 99.04% и сравнительно низким уровнем потерь — 2.69%. Это указывает на способность CNN эффективно выделять иерархические признаки в изображениях, что делает её наиболее подходящим выбором для задач распознавания рукописных символов.

LSTM также показывает хорошие результаты, особенно на наборе данных MNIST, достигая точности 97.44%. Однако, её производительность на более сложных наборах данных (EMNIST, IAM, RIMES) заметно снижается, с точностью в диапазоне от 81.57% до 84.76% и более высокими потерями, особенно на наборе данных IAM, где потери достигают 9.12%. Это свидетельствует о том, что LSTM, несмотря на свою эффективность в обработке последовательностей, менее приспособлена к задачам распознавания рукописного текста, требующим анализа пространственных признаков.

Трансформерная модель показывает относительно низкую производительность, особенно на более сложных наборах данных (IAM и RIMES), с точностью 79.46% и 81.49% соответственно и высокими потерями (более 10%). Это указывает на то, что в задачах, требующих детального анализа изображений рукописного текста, трансформеры уступают специализированным моделям, таким как CNN.

MLP также уступает по эффективности, особенно на сложных наборах данных. Несмотря на высокую точность на MNIST (97.96%), точность MLP на IAM и RIMES падает до 75.89% и 79.27% соответственно, при этом потери остаются высокими. Это свидетельствует о том, что MLP менее эффективна в выделении сложных признаков из изображений рукописного текста.

В целом, результаты указывают на преимущество свёрточных нейронных сетей (CNN) в задачах распознавания рукописного текста. CNN не только достигает высокой точности на всех наборах данных, но и демонстрирует низкий уровень потерь, что говорит о её стабильности и надёжности. LSTM и MLP могут быть эффективными для менее сложных задач, однако они уступают CNN при работе с более вариативными данными. Трансформерные модели в данном контексте оказываются наименее эффективными, что свидетельствует о необходимости дальнейшей адаптации их архитектуры для задач распознавания рукописного текста.

Перспективы дальнейших исследований заключаются в оптимизации существующих моделей, включая усовершенствование архитектуры трансформеров для обработки рукописного текста, а также в исследовании гибридных моделей, объединяющих преимущества CNN, LSTM и других подходов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Wang, Y. Offline Handwritten Text Recognition Using Deep Learning: A Review / Y. Wang, W. Xiao, S. Li // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – 7 p. – DOI 10.1088/1742-6596/1848/1/012015.
2. Mishra, A. Handwritten Text Recognition Using Convolutional Neural Network / A. Mishra, S. Ram, C. Kavyashree // Computer Vision and Pattern Recognition. – 2023. – 6 p. – DOI 10.17148/IARJSET.2021.86148.
3. Перевышин, В. Г. Сравнение точности распознавания рукописных цифр методом k-ближайших соседей (KNN) и свёрточной нейронной сетью (CNN) / В. Г. Перевышин, Р. В. Ковальчик // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 4. – С. 20-28. – EDN GOXWRE.
4. Sang, D. V. Improving CRNN with EfficientNet-like feature extractor and multi-head attention for text recognition / D. V. Sang, L. T. B. Cuong // Conference: The Tenth International Symposium. – 2019. – P. 285-290. – DOI 10.1145/3368926.3369689.
5. Attention Is All You Need / A. Vaswani, N. Shazeer, N. Parmar, J. Uszkoreit // 31st Conference on Neural Information Processing Systems. – 2017. – 15 p. – DOI 10.35940/ijrte.D7811.118419.
6. Asha, K. Handwriting Recognition using Deep Learning based Convolutional Neural Network / K. Asha, H. K. Krishnappa // International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE). – 2019. – V. 8. – № 4. – P. 4826-4828. – DOI 10.35940/ijrte.D7811.118419.
7. Pricope, T. V. A contextual analysis of multi-layer perceptron models in classifying hand-written digits and letters: limited resources / T. V. Pricope // Computer Vision and Pattern Recognition. – 2021. – 25 p. – DOI 10.48550/arXiv.2107.01782.
8. Liman, M. Handwritten Character Recognition Using Deep Learning Algorithm with Machine Learning Classifier / M. Liman, A. Josef, G. Kusuma // JOIV International Journal on Informatics Visualization. – 2024. – P. 150-157. – DOI 10.62527/joiv.8.1.1707.
9. Handwritten Digit Recognition with Python & CNN [Электронный ресурс] / TechVidvan: [Сайт]. – <https://techvidvan.com/tutorials/handwritten-digit-recognition-with-python-cnn/> (дата обращения 07.09.2024).

Поступила в редакцию 29.01.2025 г., рекомендована к печати 03.03.2025 г.

RESEARCH ON DEEP LEARNING METHODS FOR HANDWRITTEN TEXT RECOGNITION

Bondarenko V.I., Fedorov M.D.

A comparative analysis of four deep learning methods (CNN, LSTM, Transformer, MLP) for handwritten text recognition was conducted. The models were trained and evaluated on the MNIST, EMNIST, IAM, and RIMES datasets. The results show that CNN achieves the highest accuracy (99.04% on MNIST) and the lowest loss, making it the most effective method for this task. Recommendations for further development of recognition models are proposed.

Keywords: handwritten text recognition, deep learning, CNN, LSTM, Transformer, MLP, MNIST, EMNIST, IAM, RIMES.

Бондаренко Виталий Иванович

кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры компьютерных технологий ФГБОУ ВО
«Донецкий государственный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: bondarenko@donnu.ru

Bondarenko Vitalii Ivanovich

Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor, Associate Professor at Department of
Computer Technologies of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Федоров Максим Дмитриевич

магистрант кафедры компьютерных технологий
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет»,
Российская Федерация, ДНР, Донецк
E-mail: www.maksim.azot.dn@gmail.com

Fedorov Maksim Dmitrievich

Master student at Department of Computer
Technologies of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ И КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫДЕЛЕНИЯ ГОЛЬФ-УДАРОВ НА ВИДЕО

© 2025 Нестругина Е.С., Ганин Р.Ю.

В данной статье рассмотрено применение методов глубокого обучения и компьютерного зрения для автоматического выделения и классификации гольф-ударов на видео и анализа техники игроков, что является важной задачей в области спортивного анализа. Описана разработка системы аннотирования данных и классификации гольф-ударов, позволяющая автоматически распознавать различные фазы гольф-удара и ключевые точки клюшки на видеозаписях. Для анализа видеок кадров используются многослойные перцептроны и механизмы кросс-валидации (k-Fold). Предложенный подход достигает точности 98,75% при автоматическом выделении и классификации фаз удара. Дополнительно оцениваются метрики F1-score и MAE для различных компонентов системы.

Ключевые слова: автоматическое выделение ударов, глубокое обучение, компьютерное зрение, видеоданные, многослойный перцептрон, кросс-валидация, метод k-Fold, F1-score.

Введение. Гольф считается одним из самых технически сложных видов спорта, требующих от игроков мастерства, высокой степени точности и контроля над движениями. Анализ гольф-ударов является важной частью тренировки, позволяющей спортсменам улучшать свои навыки и необходим для оптимизации техники, выявления ошибок и снижения риска травм. Однако процесс разбора видеозаписей вручную чрезвычайно трудоёмок и субъективен. С развитием технологий, особенно в области глубокого обучения и компьютерного зрения, появилась возможность автоматизировать процесс анализа гольф-ударов на видео. Современные методы компьютерного зрения и глубокого обучения позволяют автоматизировать рутинные этапы аннотирования и анализа видеоматериалов. Эти подходы успешно находят применение в различных задачах спортивной аналитики, в том числе в классификации движений и оценке техники выполнения упражнений. В данной статье мы рассмотрим, как эти технологии могут быть применены для автоматического выделения и классификации гольф-ударов на видео и анализа техники игроков, обсудим методы, используемые для обработки видео, различные архитектуры глубоких нейронных сетей, алгоритмы машинного обучения, которые помогают в выявлении ключевых моментов в технике удара, а также потенциальные преимущества, которые такие системы могут предоставить как профессиональным спортсменам, так и любителям [1].

Цель исследования – разработать систему, автоматически распознающую различные фазы гольф-удара и ключевые точки клюшки на видеозаписях. Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- разработать и реализовать модуль аннотирования видеоданных для подготовки обучающего набора;
- исследовать различные архитектуры глубоких нейронных сетей, уделяя особое внимание многослойным перцептронам, для классификации фаз гольф-ударов;
- реализовать методы выделения ключевых точек клюшки на видео;
- оценить точность модели с помощью кросс-валидации методом k-Fold, а также дополнительно рассмотреть F1-score и другие метрики классификации;
- создать интерфейс визуализации результатов и проанализировать возможности обрезки видеофайлов по фазам.

Основная часть. Автоматическое выделение гольф-ударов на видео является важной задачей в области спортивного анализа, которую можно эффективно решать с помощью современных методов глубокого обучения и компьютерного зрения. Компьютерное зрение – это область искусственного интеллекта, которая позволяет компьютерам «видеть» и интерпретировать визуальную информацию из окружающего мира. Глубокое обучение, в свою очередь, является подмножеством машинного обучения, использующим нейронные сети для обработки данных. Эти технологии позволяют создавать модели, способные распознавать объекты, движения и действия на изображениях и видео.

В спортивном анализе для задач компьютерного зрения чаще всего используются свёрточные нейронные сети (CNN) [2, 3] для извлечения пространственных признаков из изображений. Эти сети хорошо справляются с задачами распознавания изображений благодаря своей способности выявлять пространственные и временные зависимости в данных. Для анализа видео с учетом временных зависимостей в видеоданных могут применяться более сложные архитектуры, такие как 3D-CNN или рекуррентные нейронные сети (RNN), включая LSTM [4], которые учитывают временные характеристики. При анализе гольф-ударов большое значение имеет точность выделения ключевых кадров и фаз: от замаха до финального положения.

Высокую эффективность в самых разных задачах обработки последовательностей (от NLP до анализа видеоданных) показывает архитектура глубоких нейронных сетей – трансформер [4, 5], благодаря механизму внимания (self-attention). Однако в данной работе для классификации фаз ударов основное внимание уделено более простой архитектуре – многослойному персептрону (MLP), который хорошо подходит для обучающей выборки, представленной векторными признаками.

Многослойные персептроны (MLP) [6] являются универсальным средством классификации сложных паттернов на основе векторных признаков. В данной работе векторные признаки формируются путём извлечения координат ключевых точек тела и клюшки. Каждому кадру соответствует набор (x, y, z)-координат 33 ключевых точек, что даёт вектор размерности 99.

Система аннотирования видеоданных. Для ручной разметки фаз удара и ключевых точек клюшки создан веб-интерфейс с использованием средств быстрого прототипирования пользовательских интерфейсов. Система включает несколько последовательных этапов [7]:

1. Загрузка видео (форматы mp4, avi, mov).
2. Извлечение кадров и их масштабирование до размера 512×512 пикселей.
3. Извлечение позовых ключевых точек с помощью библиотеки, предназначенной для детекции положения человека в кадре.
4. Ручная разметка:
 - фазы удара (P1–P10) задаются пользователем через графический интерфейс со слайдерами и полями выбора;
 - ключевые точки клюшки (рукоять, середина, «голова») размечаются при помощи интерактивного холста (canvas), где пользователь может кликать и перетаскивать точки.
5. Сохранение аннотаций в формате JSON для дальнейшего обучения [7, 8].

Сбор и подготовка данных. Первым шагом в создании системы автоматического выделения гольф-ударов является сбор данных. Для этого необходимо собрать большое количество видеозаписей с различными ударами игроков. Эти данные должны быть аннотированы, чтобы обучить модель различать удары и другие действия.

Для получения достаточно репрезентативного набора данных была проведена предварительная селекция и очистка видеозаписей. Исключались ролики с недостаточным разрешением, сильными помехами или крайне плохим освещением, так как это могло приводить к некорректному извлечению позовых ключевых точек. Далее, из каждого оставшегося видео извлекались кадры с интервалом 1-5 кадров между соседними изображениями (в зависимости от частоты съёмки), чтобы не перегружать модель избыточной информацией [8].

Дополнительно применялись фильтры, отсеивающие кадры с сильным размытием движения. На выходе каждый кадр масштабировался до 512×512 , и для каждого кадра вручную указывались фазы удара (P1–P10), а также ключевые точки клюшки. Всего было собрано около 10000 кадров, полученных из 100 различных видеозаписей гольф-ударов, что сформировало базу данных для обучения и валидации.

Во время экспериментов для обучения было проаннотировано около 10000 кадров, полученных из видеозаписей 50 различных гольф-ударов. Часть записей сделана игроками-любителями, часть – спортсменами-полупрофессионалами, что обеспечило некоторое разнообразие в стиле удара и положении тела. Углы съёмки в основном фронтальные и слегка сбоку, освещение варьируется от зала с искусственным светом до открытых площадок.

Архитектура системы. Для удобства поддерживаются несколько модулей: модуль аннотирования (веб-интерфейс), который даёт возможность навигации по кадрам и интерактивной разметки фаз; модуль обучения, загружающий аннотированные данные, формирующий обучающие выборки и обучающий модели фаз и координат клюшки; а также модуль проверки (inference), который принимает на вход новое видео, извлекает ключевые точки, предсказывает фазу для каждого кадра и координаты клюшки, а затем формирует выходной ролик с визуализацией [9].

Предобработка данных. Перед обучением модели данные должны пройти этап предобработки. Это может включать:

1. Изменение размера видео: приведение всех видеозаписей к единому разрешению.
2. Нормализация: приведение цветовых значений к стандартному диапазону.
3. Аугментация: создание дополнительных обучающих примеров путем применения различных трансформаций (повороты, отражения и т.д.) [9].

Каждый кадр видео после извлечения позовых ключевых точек становится вектором размерности 99 (33 ключевые точки $\times$ 3 координаты). Аннотацией указывается, к какой фазе (P1–P10) относится данный кадр. При наличии разметки клюшки дополнительно сохраняются координаты трёх основных точек клюшки.

Классификация фаз (Phase Model). Для классификации фаз (P1–P10) используется многослойный персептрон (MLP). Его структура включает:

- входной слой, соответствующий количеству координат (99);
- два скрытых слоя (256 и 128 нейронов) с активацией ReLU и механизмами Dropout для регуляризации;
- выходной слой из 10 нейронов (softmax) для вероятностного распределения по фазам [9].

Обучение модели. После предобработки данные используются для обучения модели. В процессе обучения модель учится распознавать паттерны, характерные для гольф-ударов. Для повышения точности можно применять методы переноса обучения, используя предварительно обученные модели на больших наборах данных. Обучение ведётся по схеме k-Fold кросс-валидации (обычно $k=5$). В качестве функции потерь применяется sparse_categorical_crossentropy, в качестве оптимизатора – Adam [9].

Для дисбалансированных классов используется механизм весовых коэффициентов, учитывающий различное количество кадров в каждой фазе.

Кроме точности (ассигасу), рассчитываются также F1-score и Precision/Recall, которые помогают точнее оценивать качество классификации при неравномерном распределении фаз [9].

Регрессия координат клюшки (Club Model). Для задачи регрессии координат клюшки применяется аналогичный многослойный перцептрон, но с линейным выходным слоем, возвращающим шесть чисел (по два на каждую ключевую точку: рукоять, середина, голова). Координаты заранее нормализуются относительно размера кадра (512×512), а для обучения применяются mse (среднеквадратическая ошибка) и метрика mae для интерпретации среднего отклонения в пикселях [10].

Сделаем выводы по результатам экспериментов.

Точность классификации фаз. В ходе экспериментов с 5-Fold кросс-валидацией средняя точность (ассигасу) достигла 98,75%. Ниже приведён примерный итог по каждому фолду:

Таблица 1. Точность модели по каждому фолду

№ фолда	Точность, %	Потери (val_loss)
1	100	0,6316
2	98,30	0,9441
3	99,10	0,9033
4	97,80	0,7416
5	98,55	0,7721
Среднее	98,75	0,7985

Лучшая модель (по валидационной точности) была получена на фолде № 1 (val_acc = 100%).

Ошибки регрессии клюшки. При обучении модели клюшки (Club Model) валидационный показатель MAE колеблется в диапазоне 2-4 пикселей (для нормализованного изображения 512×512). Это соответствует небольшому смещению предсказаний относительно реального положения рукояти, середины и головы клюшки. Использование дополнительной аугментации (случайные сдвиги, повороты) на этапе обучения может ещё сильнее снизить MAE и повысить устойчивость к шумам.

Визуализация результатов. После завершения обучения модель может быть использована для автоматического выделения ударов на новых видео. Процесс включает:

- обработку видео: разделение видео на кадры и применение модели для каждого кадра;
- выявление ударов: определение моментов времени, когда происходит удар, основываясь на предсказаниях модели;
- синхронизацию с данными: сопоставление выделенных моментов с другими данными, такими как скорость удара или направление мяча [10].

Пользователь может загрузить новое видео в модуль проверки, где система автоматически извлекает ключевые точки позы для каждого кадра, предсказывает фазу (P1–P10) и координаты клюшки (при наличии обученной модели), а затем формирует ролик с наложением текущей фазы и ключевых точек (рукоять, середина и голова соединяются линией). Кроме того, система обрезает видео по первым найденным кадрам фаз P1 и P10, что позволяет быстро выделить «полный» цикл удара; таким образом, достигается не только количественная оценка качества распознавания, но и визуальная проверка корректности определения ключевых точек и фаз.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности подхода, основанного на многослойных перцептронах, в задаче классификации фаз гольф-удара. Средняя точность ~98,75% и F1-score ~0,97-0,99 говорят о том, что модель способна надёжно идентифицировать стадии удара даже при некоторой вариативности стиля игроков и условий съёмки. Погрешность 2-4 пикселей при регрессии координат клюшки представляется приемлемой для задач первичного анализа.

Аналогичные исследования, связанные с анализом движений в спорте, показывают схожие результаты. Например, некоторые работы по распознаванию фехтовальных выпадов или бейсбольных подач достигают точности 95-97% на аналогичных объёмах данных. Наш результат в 98,75% является сопоставимым или даже превосходящим многие из них, хотя прямое сравнение затруднено из-за отличий в типе движения и датасете.

Основные преимущества системы:

- универсальность: модуль аннотирования и общая схема работы легко адаптируются под другие виды движений и спорта;
- автоматизация: ручная разметка упрощается за счёт дружелюбного интерфейса, что снижает трудозатраты оператора;
- высокая точность: полученные метрики (accuracy, F1-score) удовлетворяют современным запросам спортивной аналитики.

Среди ограничений следует выделить:

- зависимость от качества видео: тёмные, размазанные или низкокачественные кадры могут приводить к ошибкам детекции ключевых точек;
- требовательность к объёму данных: для ещё более точной детекции положений клюшки желательно иметь разнообразные ракурсы и условия съёмки, что требует больших ресурсов на сбор и аннотирование;
- сложность сравнения с другими видами спорта: детали механики движений и характер движения клюшки специфичны именно для гольфа.

Автоматическое выделение гольф-ударов может быть использовано для различных целей:

- анализ техники: тренеры могут использовать результаты для анализа техники игроков и выявления областей для улучшения;
- создание обучающих материалов: на основе выделенных ударов можно создавать обучающие видео для начинающих игроков;
- сравнительный анализ: позволяет сравнивать технику разных игроков и выявлять лучшие практики [10].

Выводы. Методы глубокого обучения и компьютерного зрения позволяют успешно решать задачу автоматического выделения и классификации гольф-ударов на видео. Разработанная система включает:

- веб-интерфейс аннотирования (ручная разметка фаз и ключевых точек клюшки),
- модуль обучения (многослойный перцептрон с k-Fold кросс-валидацией и учётом весов классов),
- модуль проверки (генерация выходного видео с наложенными фазами и ключевыми точками клюшки).

Достигнутые результаты (точность ~98,75%, F1-score ~0,97-0,99, MAE ~2-4 пикселей) подтверждают эффективность и практическую ценность представленного подхода.

В дальнейшем возможно:

- применить аугментацию данных (сдвиги, шумы, зеркальные отражения, повороты) для повышения обобщающей способности модели;
- увеличить базу данных за счёт добавления записей под разными углами и в различных условиях освещения, что позволит повысить устойчивость к разнообразию реальных ситуаций;
- добавить анализ ошибок в технике удара, которые могут допускать гольфисты. Это позволит не только классифицировать фазы, но и выявлять отклонения от оптимальной траектории и положения клюшки, предоставляя расширенный инструментарий для тренеров и спортсменов.

Использование методов глубокого обучения и компьютерного зрения для автоматического выделения гольф-ударов на видео открывает новые горизонты в спортивном анализе. Эти технологии не только повышают эффективность тренировочного процесса, но и делают его более доступным для широкого круга игроков. В будущем можно ожидать дальнейшего развития этих методов, что приведет к еще более точным и эффективным инструментам для анализа спортивной техники.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пьерри, Э. Анализ кинематики гольф-удара: систематический обзор / Э. Пьерри, Р. Ди Микеле // Journal of Sports Science Medicine. – 2015. – Т. 14, № 3. – С. 486–499. – DOI 10.1234/jssm.2015.14.3.486.
2. Окита, Т. Автоматическая сегментация фаз гольф-удара с помощью глубокого обучения / Т. Окита, М. Гринберг, Д. Фридман // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. – 2021. – Т. 32, № 6. – С. 3451–3462. – DOI 10.1109/TNNLS.2021.3056789.
3. Hochreiter, S. Long Short-Term Memory / S. Hochreiter, J. Schmidhuber // Neural Computation. – 1997. – V. 9, № 8. – P. 1735–1780. – DOI 10.1162/neco.1997.9.8.1735.
4. Ji, S. 3D Convolutional Neural Networks for Human Action Recognition / S. Ji [et al.] // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2013. – V. 35, № 1. – P. 221–231. – DOI 10.1109/TPAMI.2012.59.
5. Krizhevsky, A. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks / A. Krizhevsky, I. Sutskever, G. E. Hinton // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2012. – P. 1097–1105.
6. DeepPoseGolf: Pose-based detection of golf swing mechanics using MLP networks / P. Cook, B. Joyner, T. Tassinari, F. Carter // Pattern Recognition Letters. – 2022. – V. 152. – 9 p. – DOI 10.1016/j.patrec.2021.09.012.
7. Гудфеллоу, Я. Глубокое обучение / Я. Гудфеллоу, И. Бенджио, А. Курвилль; пер. с англ. – М.: ДМК Пресс, 2018. – 652 с.
8. Dropout: A Simple Way to Prevent Neural Networks from Overfitting / N. Srivastava [et al.] // Journal of Machine Learning Research. – 2014. – V. 15. – P. 1929–1958.
9. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding / J. Devlin, M. W. Chang, K. Lee, K. Toutanova // Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics. – 2019. – P. 4171–4186.
10. Attention is All You Need / A. Vaswani [et al.] // Advances in Neural Information Processing Systems. – 2017. – P. 5998–6008.

Поступила в редакцию 30.01.2025 г., рекомендована к печати 05.03.2025 г.

USING DEEP LEARNING AND COMPUTER VISION METHODS TO AUTOMATICALLY
EXTRACT GOLF SHOTS IN VIDEO

Nestrugina E.S., Ganin R.IU.

This article discusses the use of deep learning and computer vision methods to automatically extract and classify golf shots on video and analyze players' technique, which is an important task in the field of sports analysis. The development of a data annotation and golf swing classification system is described that allows automatic recognition of different phases of a golf swing and key club points in video recordings. Multilayer perceptrons and cross-validation mechanisms (k-Fold) are used to analyze video frames. The proposed approach achieves an accuracy of 98,75% when automatically identifying and classifying impact phases. Additionally, the F1-score and MAE metrics are evaluated for various system components.

Keywords: automatic swing detection, deep learning, computer vision, video data, multilayer perceptron, cross-validation, k-fold method, F1-score.

Нестругина Елена Сергеевна

кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры компьютерных технологий ФГБОУ ВО
«Донецкий государственный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: e.nestrugina@donnu.ru

Nestrugina Elena Sergeevna

Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor, Associate Professor at Department of
Computer Technologies of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Ганин Руслан Юрьевич

магистрант кафедры компьютерных технологий
ФГБОУ ВО «Донецкий государственный
университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: grycbka@yandex.ru

Ganin Ruslan IUrevich

Master student at Department of Computer
Technologies of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ ПРИ АНАЛИЗЕ СОСТОЯНИЯ ВОДИТЕЛЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ УСТАЛОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРО-СЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

© 2025 *Салтанаева Е.А., Куценко С.М.*

В статье рассмотрены методы распознавания образов, решающие актуальную задачу анализа изображений. Среди рассмотренных методов отдано предпочтение системам распознавания образов на основе искусственного интеллекта. Наиболее эффективной и точной методикой является методика обучения глубоких нейронных сетей. Авторами было разработано мобильное приложение для определения усталости водителя, основанное на использовании сверточных нейронных сетей. Данные предварительно были обработаны, а именно они были очищены вручную путем удаления нежелательных изображений, которые не являлись необходимыми для построения модели. Данные содержат около 7000 изображений глаз людей при различных условиях освещения. Предложенное мобильное приложение достаточно надежно и эффективно, и позволит повысить общедоступность систем контроля усталости водителя.

Ключевые слова: методы распознавания образов, искусственный интеллект, сверточные нейронные сети, состояние водителя.

Введение. Распознавание образов – тема, по которой ведется огромное количество разработок ввиду ее не уменьшающейся актуальности. Системы распознавания образов активно и успешно используются в робототехнике, в системах smart-устройств и smart-городов, системах безопасности, системах контроля качества продукции на производстве, медицинской диагностике и даже системах мониторинга состояния растений в сельском хозяйстве [1-4]. Среди задач, решаемых технологиями распознавания образов в автомобильной отрасли, был сделан акцент на системах оценки степени усталости водителя, поскольку дорожно-транспортные происшествия, которые связаны с усталостью водителя, приводят к тяжелым травмам и смертям. Для достижения этой цели оптимально применить искусственный интеллект и нейросетевые технологии с реализацией в виде мобильного приложения, созданного на основе методов распознавания образов с применением сверточной нейронной сети, и обладающего достаточной надежностью и эффективностью, что позволит расширить доступность систем контроля усталости водителя [5]. Алгоритм работы подобной системы должен подразумевать получение изображения с камеры, обнаружение лица на изображении, обнаружение глаз в области интереса, классификация состояния глаз и изменение состояния счетчика состояния глаз. Корректность работы и надежность – это важный аспект разработки программного обеспечения, в том числе и нейросетей.

Объекты и методы исследования. Трудности при проектировании и разработке автоматизированных систем определения усталости связаны с тем, что необходимо учитывать множественные сложные человеческие физиологические факторы, которые отвечают за проявление сонливости, поскольку данные системы предполагают высокую точность при различных условиях эксплуатации [6, 7].

В случае системы визуального анализа состояния водителя во время движения наиболее важным аспектом безопасности является именно точность распознавания, т.к. при допущении нейронной сетью ошибки, последствия могут стать серьезными.

Программная технология должна быть оптимизирована для обеспечения чувствительности и специфичности. Количество ложноотрицательных результатов должно быть сведено к минимуму благодаря точному и надежному обнаружению сниженных уровней бдительности. Ложные срабатывания должны быть сведены к минимуму благодаря точной и надежной идентификации безопасного вождения и бдительности оператора.

Имеющееся на данный момент разработанное программное обеспечение для определения усталости использует различные физиологические сигналы для определения состояния усталости или сонливости. Часть систем основаны на измерении мозговой активности электрическими импульсами (электроэнцефалограмма), что широко признано в качестве стандарта в мониторинге усталости. Другие используют для определения усталости внешние признаки, такие как поведение глаз, изменение направления взгляда, сердечные ритмы, микрокоррекцию при рулевом управлении.

Методы, использующие физиологические сигналы человека, имеют недостатки. Например, обнаружение зевоты затрудняет точное определение положения губ. В свою очередь, для обнаружения кивков головы требуется, чтобы электроды были прикреплены к коже головы, для электроэнцефалограммы необходимо дорогостоящее оборудование.

Надежная система также должна быть способна отслеживать быстрые движения головы и глаз, анализировать закрытие глаз и положение головы, чтобы определить раннее наступление усталости и рассеянности. Алгоритм определения усталости должен вычислять среднее значение закрытия глаз, а именно процент времени, в течение которого глаза полностью закрыты в течение одноминутного интервала.

Состав системы компьютерного зрения предполагает наличие установленной на приборной панели камеры, источников освещения для лица водителя и программного обеспечения для отслеживания и анализа состояния водителя.

В настоящее время, системы распознавания образов на основе искусственного интеллекта являются незаменимыми во многих областях, таких как медицина, автоматизация производства, автоматическое распознавание лиц и многие другие. Существует множество методов и подходов к построению таких систем, и каждый из них имеет свои преимущества и недостатки. Кроме того, методы глубокого обучения для распознавания действий успешно применяются на мобильных устройствах, не требуют отдельных шагов выбора признаков для определения положения глаз, рта или головы и обладают потенциалом дальнейшего повышения точности прогнозирования [8].

Среди методов распознавания образов используют следующие: сравнивающие изображения с шаблонными образцами; использующие имитацию работы человеческого мозга (нейронные сети); основывающиеся на геометрических характеристиках образов; способные обучаться на имеющихся классифицированных наборах данных (методы машинного обучения); использующие теорию вероятности и статистического распознавания. В некоторых случаях можно использовать различные комбинации перечисленных методов, что повысит точность результатов распознавания [9].

Построение систем распознавания образов на основе искусственного интеллекта – это сложный и многоэтапный процесс, который требует глубоких знаний в области математики, статистики и информатики. Системы распознавания образов, основанные на искусственном интеллекте, представляют собой мощный инструмент для решения этой задачи.

Большинство авторов сходятся во мнении, что наилучшие результаты показывают системы распознавания образов, основанные на использовании методов машинного обучения. Для этого необходимо иметь большой набор данных, с помощью которого система будет обучаться. Этот набор должен содержать изображения различных объектов, которые система должна распознавать. Обучение может проходить на основе различных методов, таких как методы обучения с учителем, обучения без учителя и многие другие. Наиболее эффективной и точной методикой является методика обучения глубоких нейронных сетей [10-12]. Она позволяет системе распознавать объекты на изображениях с высокой точностью и скоростью.

Машинное обучение предназначено для того, чтобы обработать данные, представленные в виде графов, схем либо таблиц, что в результате составляет структуру сети или модель сети [13]. Для создания нейросети и ее глубокого обучения был использован тандем библиотек Keras и TensorFlow, соответственно для настройки моделей нейросетей и выполнения расчетов [14].

Сначала нейронную сеть необходимо обучить [15]. Для этого используются различные входные данные с заранее описанными выводами. Результатом обучения будет являться связь между характеристиками данных и выводами. В качестве настройки модели может выступить и обучение сети, в процессе которого накапливается достаточно характеристик для распознавания деталей на изображении.

При реализации глубокого обучения модель представляет собой блоки нейронов, сгруппированных в слои (рисунок 1). Каждый последующий слой является результатом вычислений, произведенных над входными данными предыдущего слоя. Потому большое количество слоев скрытого уровня дает более высокую точность обучения модели. Выходной слой модели при глубоком обучении показывает высокую вероятность ожидаемого результата распознавания [16, 17].

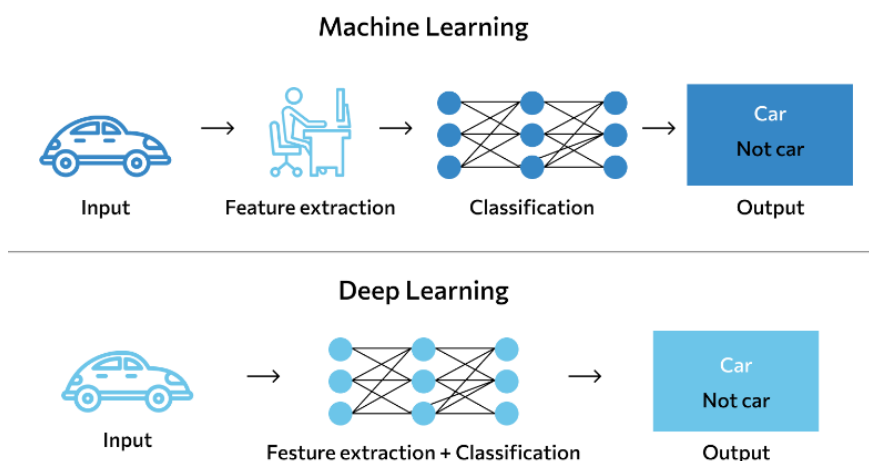


Рис. 1. Машинное обучение и глубокое обучение

Сверточная нейронная сеть – это особый тип глубокой нейронной сети, которая чрезвычайно хорошо подходит для целей классификации изображений.

Результаты и их обсуждение. Авторами было разработано мобильное приложение для определения усталости водителя, основанное на использовании сверточных нейронных сетей.

Для слоев сети выполняется операция свертки с использованием фильтра, который выполняет умножение 2D-матрицы на слое и фильтре.

Архитектура модели сверточной нейронной сети состоит из следующих уровней:
сверточный слой: 32 узла, размер ядра 3;
сверточный слой: 32 узла, размер ядра 3;
сверточный слой: 64 узла, размер ядра 3;
Полностью подключенный уровень: 128 узлов.

Последний уровень также является полностью подключенным уровнем с 2 узлами. Во всех слоях была использована функция активации Relu. На выходном слое использована функция Softmax.

При разработке системы были использованы следующие инструменты: Python и его библиотеки OpenCV – `pip install opencv-python`, TensorFlow – `pip install tensorflow`, Keras – `pip install keras`, Pygame – `pip install pygame` [18-20].

Инструмент Keras позволил создать, визуализировать и запустить сеть с заданными параметрами, поскольку описание слоев для полноценной нейронной сети является очень трудоемким и длительным процессом. Перед началом обучения и сборки сети с помощью Keras достаточно в несколько строк описать инициализацию свойств создаваемой модели, а именно ее глубину, плотность, принцип расчетов и т.д.

При разработке структуры данных системы была проделана следующая последовательность операций. Для создания набора данных для обучения был написан скрипт, который фиксирует глаза с камеры и сохраняет их на локальном диске. Изображения были разделены на соответствующие метки 'Open' или 'Closed' [21].

Данные предварительно были обработаны, а именно они были очищены вручную путем удаления нежелательных изображений, которые не являлись необходимыми для построения модели. Данные содержат около 7000 изображений глаз людей при различных условиях освещения.

После обучения модели на наборе данных закрепили окончательные веса (сила воздействия) и файл архитектуры модели "models / cnnCat2.h5".

После всех проделанных действий можно использовать эту модель для классификации определения состояния глаз человека (открыты/закрыты).

Алгоритм, лежащий в основе разработанной системы, заключается в следующем:

1. Получение изображения в качестве входных данных с камеры. Обязательным компонентом разработанной системы является наличие встроенной или внешней веб-камеры, средствами которой будет захватываться изображение в качестве входных данных. Был использован метод `cv2.VideoCapture(0)` из библиотеки OpenCV для доступа к камере, анализа видео и установки объекта захвата. Написан бесконечный цикл для захвата каждого кадра. Функция `Cap.read()` считывает каждый кадр и сохраняет изображение в переменной кадра.

2. Обнаружение лица на изображении и настройка области интереса.

В начале изображение было преобразовано в оттенки серого, был использован каскадный классификатор Хаара для обнаружения лиц `face=cv2.CascadeClassifier('путь к xml-файлу каскада хаара')`. Затем выполняется обнаружение с помощью `face.detectMultiScale(gray)`. В результате получаем массив обнаруженных изображений лиц. Для рисования границ рамки вокруг лица использована функция `cv2.rectangle(frame,(x,y),(x+w, y+h),(100,100,100),1)` в цикле с входными параметрами высоты, ширины и координатами (x,y) пограничного поля объекта.

3. Обнаружение глаз в области интереса и передача в классификатор.

Для обнаружения глаз, во-первых, устанавливается каскадный классификатор для глаз в `leye` и `reye` соответственно, а затем идет обнаружение глаз, используя, например, `left_eye = leye.detectMultiScale(gray)`.

Далее требуется извлечь данные глаз из кадра с помощью следующего кода: `l_eye=frame[y:y+h,x:x+w]`. Переменная `l_eye` содержит только данные изображения глаза, что было введено в классификатор сверточной нейронной сети для предсказания состояния глаз. Для правого глаза запись сделана соответственно в `r_eye`.

4. Классификация состояния глаз. Используется классификатор сверточной нейронной сети для прогнозирования состояния глаз. Чтобы передать изображение в модель, необходимо предварительно провести определенные операции с параметрами (цвет и размер изображения). Перевод цветного изображения в оттенки серого – `r_eye=cv2.cvtColor(r_eye,cv2.COLOR_BGR2GRAY)`. Изменение размера изображения до 24x24 пикселя (используемых при обучении модели) – `cv2.resize(r_eye, (24,24))`. После чего проведена нормализация данных для лучшей сходимости обучения `r_eye=r_eye/255` (все значения будут между 0-1). Для загрузки модели, используется `load_model('models/cnnCat2.h5')`.

Теперь можно оценить вероятность состояния каждого глаза с помощью модели `lpred = model.predict_classes(l_eye)`. Значение равное 1 соответствует большей вероятности открытых глаз. Значение равное 0 утверждает, что глаза закрыты.

5. Счетчик состояния глаз. Счетчик используется в системе для определения длительности одного из двух состояний глаз – открыты или закрыты. Если оба глаза закрыты, счет будет увеличиваться, а когда глаза открыты, он будет уменьшаться. Вывод результатов на экране мобильного устройства реализован с помощью функции `cv2.putText()`, которая будет отображать статус человека в реальном времени – `cv2.putText(frame, "Open", (10, height-20), font, 1, (255, 255, 255), 1, cv2.LINE_AA)`.

На рисунке 2 схематично показана работа приложения, где показано определение области лица и глаз, выявление состояния глаз – открытые, значение счетчика `Score = 0`.

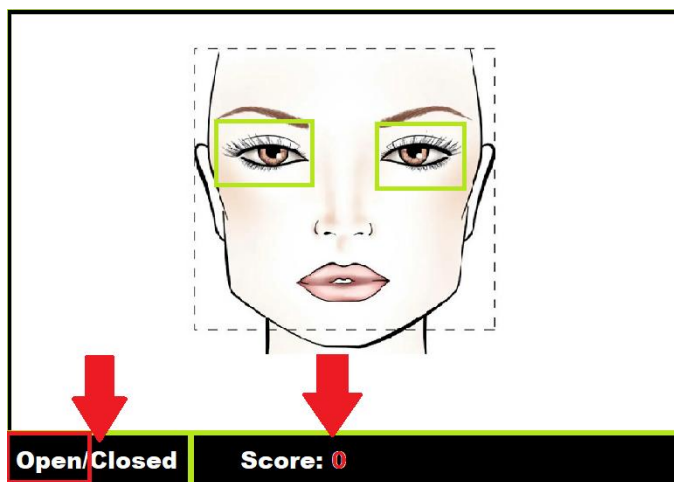


Рис. 2. Макет работающего окна приложения

Усталость водителя ведет к периодам микросна - периоды сна продолжительностью в несколько секунд, часто появляющиеся в процессе решения рутинных задач, например, в процессе вождения. При апробации приложения авторами статьи в качестве порога закрытия глаз использовалось значение счетчика, равное 15, что соответствует 4 секундам. Это означает, что глаза человека закрыты в течение длительного периода времени, и косвенно считается, что человек заснул. В этом случае срабатывает будильник, реализованный посредством `sound.play()`. В предлагаемом мобильном приложении значение счетчика может быть изменено по требованию пользователя.

Заключение. Для анализа состояния водителя могут быть использованы физиологические методы, методы, основанные на анализе поведения водителя. Однако все они имеют определённые сложности и недостатки в реализации, при этом они не обеспечивают должный уровень эффективности и надёжности.

Поэтому в настоящее время при анализе состояния водителя для оценки степени усталости все чаще применяют системы распознавания образов. При разработке таких систем обычно надо иметь большое количество данных и высокие требования к вычислительным ресурсам. Это оптимально реализовать с помощью искусственного интеллекта и нейросетевых технологий. Методы машинного обучения, используемые при распознавании образов, представляют собой сложную совокупность методов оптимизации и математических дисциплин. Отдавать предпочтение следует нейросетевым методам, поскольку они легче поддаются обучению. Предложенное мобильное приложение, разработанное на основе метода распознавания образов с использованием сверточной нейронной сети, достаточно надёжно и эффективно, и позволит повысить общедоступность систем контроля усталости водителя.

Использование методов распознавания образов для анализа состояния водителя и внедрение программных систем, аналогичных разработанной авторами, может иметь большое значение для обеспечения безопасности на дорогах и предотвращения возможных дорожно-транспортных происшествий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Алексеев, И. П. Перспективы применения капсульных нейронных сетей в распознавании объектов на изображениях / И. П. Алексеев, Т. В. Лаптева // КИП и автоматика: обслуживание и ремонт. – 2022. – № 1. – С. 50-53. – EDN BEVXOS.
2. Хамитов, Р. М. Применение искусственного интеллекта в транспорте и логистике / Р. М. Хамитов // Актуальные проблемы транспорта в XXI веке: Труды II Международной научно-практической конференции, Новокузнецк, 12–13 апреля 2023 года / Под редакцией О.В. Князькиной. – Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2023. – С. 88-92. – EDN DXWAOA.
3. Зарипова, Р. С. Перспективы развития искусственного интеллекта в условиях развития цифровой экономики / Р. С. Зарипова, О. А. Рочева, И. Т. Гайсин // Наука Красноярья. – 2023. – Т. 12, № 1-3. – С. 42-46. – EDN RJNBVM.
4. Магомадова, А. Р. Влияние искусственного интеллекта на обработку естественного языка в ит-технологиях / А. Р. Магомадова, А. Ш. Сапарбиев, А. В. Натальсон // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 12. – С. 323-325. – EDN UFJNRV.
5. Парфенов, А. А. Области применения искусственного интеллекта / А. А. Парфенов, Р. И. Эшелиоглу // Аллея науки. – 2018. – Т. 3, № 4(20). – С. 975-977. – EDN XOYBUT.
6. Салтанаева, Е. А. Автомобильные комплексные системы контроля состояния водителя / Е. А. Салтанаева, С. М. Куценко // International Journal of Advanced Studies. – 2023. – Т. 13, № 3-2. – С. 33-38. – EDN WXHSTD.
7. Мартин, Р. Чистая архитектура. Искусство разработки программного обеспечения / Р. Мартин. – СПб: Питер, 2022. – 352 с.
8. Лукашкин, Н. А. Глубокое обучение для обработки данных / Н. А. Лукашкин. – М: ДМК Пресс, 2018. – 392 с.
9. Станиславский, К. О. Обработка изображений с помощью нейронных сетей / К. О. Станиславский. – М: Лань, 2018. – 256 с.
10. Скударь, Ю. В. Глубокое обучение для разработчиков / Ю. В. Скударь, М. П. Кузнецов. – М: ООО «Диалектика», 2018. – 304 с.
11. Сафин, Р. Ф. Нейросети и глубокое обучение / Р. Ф. Сафин, Т. В. Гайфуллин. – М: БХВ-Петербург, 2018. – 352 с.
12. Иванов, А. А. Глубокое обучение / А. А. Иванов. – М: БХВ-Петербург, 2018. – 108 с.
13. Григорьев, А. Машинное обучение. Портфолио реальных проектов / А. Григорьев. – СПб: Питер, 2023. – 496 с.

14. Куценко, С. М. Выбор инструментов построения нейронной сети / С. М. Куценко, Е. А. Салтанаева // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 12. – С. 313-315. – EDN AWNBLJ.
15. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – М.: ООО «Диалектика», 2019. – 1104 с.
16. Шолле, Ф. Глубокое обучение на Python / Ф. Шолле. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2019. – 312 с.
17. Траск, Э. Грогаем глубокое обучение / Э. Траск. – СПб: Питер, 2022. – 352 с.
18. Плас, Дж. Python для сложных задач: наука о данных и машинное обучение / Дж. Плас. – СПб: Питер, 2021. – 576 с.
19. Орельен, Ж. Прикладное машинное обучение с помощью Scikit-Learn, Keras и TensorFlow: концепции, инструменты и техники для создания интеллектуальных систем / Ж. Орельен. – СПб: ООО «Диалектика», 2020. – 1040 с.
20. Шорина, Т. В. распознавание визуальных образов средствами языка программирования Python / Т. В. Шорина, Р. М. Хамитов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2023. – № 12. – С. 639-641. – EDN HVYLBA.
21. Бардашова, А. И. Система визуального анализа состояния водителя во время движения / А. И. Бардашова, Е. А. Салтанаева // Вопросы науки и образования: теоретические и практические аспекты: материалы Международной (заочной) научно-практической конференции, Прага, 17 мая 2023 года. – Нефтекамск: Научно-издательский центр "Мир науки" (ИП Вострецов Александр Ильич), 2023. – С. 13-15. – EDN JAMMBK.

Поступила в редакцию 25.02.2025 г., рекомендована к печати 13.03.2025 г.

APPLICATION OF PATTERN RECOGNITION TECHNIQUES IN DRIVER CONDITION ANALYSIS FOR FATIGUE ASSESSMENT USING NEURAL NETWORK TECHNOLOGY

Saltanaeva E.A., Kutsenko S.M.

The article considers the methods of pattern recognition, solving the actual problem of image analysis. Among the considered methods, preference is given to pattern recognition systems based on artificial intelligence. The most effective and accurate technique is the technique of training deep neural networks. The authors developed a mobile application for driver fatigue detection based on the use of convolutional neural networks. The data was pre-processed, namely it was manually cleaned by removing unwanted images that were not necessary for model building. The data contains about 7000 images of people's eyes under different lighting conditions. The proposed mobile application is quite robust and efficient and will increase the public availability of driver fatigue monitoring systems.

Keywords: pattern recognition methods, artificial intelligence, convolutional neural networks, driver state.

Салтанаева Елена Андреевна

кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий и интеллектуальных систем ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», Российская Федерация, Республика Татарстан, г. Казань.

E-mail: elena_maister@mail.ru

Saltanaeva Elena Andreevna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Information Technologies and Intelligent Systems of Kazan State Power Engineering University, Russian Federation, Republic of Tatarstan, Kazan.

Куценко Светлана Мунавировна

кандидат педагогических наук, доцент, доцент кафедры информационных технологий и интеллектуальных систем ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», Российская Федерация, Республика Татарстан, г. Казань.

E-mail: s.koutsenko@mail.ru

Kutsenko Svetlana Munavirovna

Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of Information Technologies and Intelligent Systems of Kazan State Power Engineering University, Russian Federation, Republic of Tatarstan, Kazan.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ О ВЫЯВЛЕНИИ УЯЗВИМОСТЕЙ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В ЦЕЛЯХ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ И ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

© 2025 *Зверев Г.И., Ефимов А.О.*

Рассматривается вопрос автоматизации процессов анализа информации об уязвимостях программного обеспечения с целью эффективного управления информационной безопасностью автоматизированных систем. Предложен порядок соотнесения данных технического паспорта автоматизированной системы, содержащего сведения о программном обеспечении, с данными баз данных уязвимостей. Описаны методы автоматизированного сбора информации о версиях программного обеспечения, а также представлены алгоритмы и UML-диаграммы, описывающие последовательность процессов идентификации, классификации и интерпретации выявленных уязвимостей. Рассматриваются вопросы интеграции методики в системы поддержки принятия решений, обеспечивающие адаптивный мониторинг состояния безопасности и управление рисками, связанными с эксплуатацией программного обеспечения. Подход направлен на повышение оперативности и точности обработки данных в целях решения задач управления и принятия решений.

Ключевые слова: уязвимости, программное обеспечение, алгоритмы, UML-модели, управление, принятие решений.

Введение. Современные информационные системы характеризуются высокой степенью сложности, обусловленной постоянным увеличением объемов программных средств, их функциональной взаимосвязанностью и динамическим развитием технологической инфраструктуры. В условиях стремительного роста количества программных продуктов, их регулярных обновлений и постоянного выявления новых уязвимостей, актуальной задачей является обеспечение своевременного мониторинга их состояния и поддержания в актуальном и безопасном виде. Несвоевременное обновление программного обеспечения (ПО) или игнорирование информации о выявленных уязвимостях может привести к значительным рискам в области информационной безопасности, включая компрометацию данных, несанкционированный доступ и нарушение целостности автоматизированных систем.

Одним из факторов, усложняющих процесс управления уязвимостями, является широкое распространение программного обеспечения с открытым исходным кодом. Несмотря на многочисленные преимущества таких решений, включая гибкость настройки и оперативное выявление недостатков в коде сообществом разработчиков, они также подвержены рискам, связанным с отсутствием централизованного контроля за безопасностью и разрозненностью используемых версий. В результате организации вынуждены самостоятельно отслеживать состояние каждого компонента, что требует значительных временных и вычислительных ресурсов.

Дополнительные сложности в обработке информации о выявленных уязвимостях связаны с масштабированием информационных систем, включающих в себя десятки и сотни программных компонентов, часто разрабатываемых разными производителями и использующих различные методы распространения обновлений. В условиях постоянного изменения версий программного обеспечения и появления новых уязвимостей традиционные методы ручного мониторинга и анализа становятся неэффективными.

Это требует разработки и внедрения автоматизированных механизмов сбора, анализа и обработки информации об уязвимостях, что позволит значительно повысить оперативность реагирования на потенциальные угрозы и снизить уровень риска.

Актуальность рассматриваемой проблемы обусловлена не только ростом числа угроз в киберпространстве, но и необходимостью обеспечения соответствия информационных систем нормативным требованиям по информационной безопасности. В настоящее время существует множество специализированных баз данных уязвимостей, таких как CVE [1], NVD [2], ФСТЭК России [3] и другие, содержащих детализированные сведения о выявленных уязвимостях, их характеристиках и методах устранения. Однако эффективное использование этих данных требует автоматизированных методов их обработки и соотнесения с конкретными конфигурациями программного обеспечения, установленного в информационной системе.

Настоящая работа направлена на разработку алгоритмов и моделей, обеспечивающих автоматизацию процесса сбора, обработки и анализа информации о выявленных уязвимостях программного обеспечения. В рамках исследования рассматриваются вопросы интеграции данных технического паспорта автоматизированной системы с внешними базами уязвимостей, разрабатываются алгоритмы автоматизированного поиска и идентификации уязвимых версий ПО, а также формируются модели обработки данных, основанные на принципах анализа взаимосвязанных объектов. Полученные результаты могут быть использованы при построении систем поддержки принятия решений в области информационной безопасности, позволяя повысить эффективность управления рисками, связанными с эксплуатацией уязвимого программного обеспечения в целях решения задач управления [4] и принятия решений [5].

Обработка информации о выявлении уязвимостей программного обеспечения. Аттестация объектов информатизации является одной из ключевых процедур обеспечения информационной безопасности, направленной на подтверждение соответствия автоматизированных систем установленным требованиям защиты информации. В соответствии с приказом ФСТЭК России от 29 апреля 2021 г. № 77 «Об утверждении Положения об аттестации объектов информатизации» [6], данная процедура включает в себя ряд мероприятий, связанных с анализом конфигурации информационной системы, идентификацией потенциальных угроз, проверкой применяемых мер защиты и оценкой их эффективности.

Одним из обязательных элементов аттестации является формирование технического паспорта информационной системы (ИС), содержащего исчерпывающие сведения о ее программно-аппаратной конфигурации, включая перечень установленного ПО. В техническом паспорте фиксируются названия программных продуктов, их версии, разработчики, а также, при необходимости, сведения о применяемых средствах защиты информации [7-8]. Данный документ служит основой для проведения анализа защищенности объекта информатизации, позволяя оценить актуальность используемых программных средств и потенциальные риски, связанные с их эксплуатацией.

Одним из наиболее значимых аспектов управления уязвимостями в автоматизированных системах является регулярный мониторинг состояния установленного программного обеспечения и сопоставление его версий с актуальными данными о выявленных уязвимостях [9].

Автоматизированное соотнесение информации из технического паспорта с указанными базами данных позволит оперативно выявлять уязвимые версии программного обеспечения, оценивать их критичность и принимать обоснованные решения о необходимости обновления или применения компенсирующих мер защиты. Процесс сопоставления включает в себя несколько этапов:

1. Сбор и нормализация данных – информация о версиях программного обеспечения, содержащаяся в техническом паспорте, приводится к единому формату, позволяющему ее дальнейшую обработку.

2. Автоматизированный поиск соответствий – выполняется сверка версии ПО с записями в базе данных уязвимостей с целью выявления потенциальных рисков.

3. Анализ критичности уязвимостей – в случае обнаружения соответствий проводится оценка возможных последствий эксплуатации уязвимости с использованием метрик Common Vulnerability Scoring System (CVSS).

4. Формирование отчета и рекомендации – создается аналитический отчет, содержащий перечень уязвимостей, их классификацию и рекомендации по устранению выявленных рисков.

К вопросу об электронных технических паспортах. Несмотря на значимость технического паспорта, как инструмента документирования конфигурации информационной системы, традиционные методы его ведения на бумажных или статичных электронных носителях обладают существенными недостатками. Одним из наиболее серьезных ограничений является необходимость ручного обновления сведений, что может приводить к несоответствию фактического состояния системы и документированной информации [10-13].

В условиях динамичного развития программных средств, постоянного выпуска обновлений и появления новых угроз критически важно обеспечить актуальность сведений о программном обеспечении в режиме реального времени.

Наиболее эффективным решением данной проблемы является внедрение электронных технических паспортов, обладающих возможностью автоматизированного обновления информации о конфигурации системы. Реализация данной концепции предполагает [14-19]:

1. Автоматизированный сбор данных об установленном ПО и его версиях с использованием специализированных программных агентов;

2. Интеграцию с базами данных уязвимостей для оперативного выявления потенциальных угроз;

3. Формирование динамических отчетов о состоянии безопасности программного обеспечения с возможностью генерации рекомендаций в автоматическом режиме;

4. Возможность удаленного мониторинга и централизованного управления уязвимостями, что особенно актуально для крупных распределенных систем.

Переход к электронным техническим паспортам позволит не только снизить затраты на ручную обработку информации, но и существенно повысить уровень защищенности автоматизированных систем за счет своевременного выявления и устранения уязвимостей. Такой подход обеспечит более высокий уровень соответствия требованиям нормативных документов в области информационной безопасности, повысит эффективность управления рисками и создаст основу для построения адаптивных систем мониторинга и реагирования на киберугрозы [20-21].

Алгоритмы обработки информации о выявлении уязвимостей программного обеспечения. Процесс обработки информации о выявлении уязвимостей ПО можно разделить на два основных этапа:

1. Формирование локального отчета, об уязвимостях компонента информационной (автоматизированной) системы.

Формирование локального отчета об уязвимостях программного и аппаратного обеспечения, входящего в состав информационной (автоматизированной) системы, представляет собой ключевой этап в процессе обеспечения ее защищенности. Такой отчет позволяет своевременно выявлять потенциальные угрозы, оценивать их критичность и разрабатывать рекомендации по минимизации рисков. Процесс формирования отчета включает несколько этапов, каждый из которых направлен на систематизированный анализ уязвимостей конкретного компонента системы.

На начальном этапе осуществляется идентификация исследуемого компонента, включая: его наименование и версию; производителя и дату выпуска; используемые модули, библиотеки и зависимости; возможные каналы обновления и поддержки.

Данные могут быть получены из технического паспорта информационной системы, систем управления конфигурацией (CMDB), инструментов автоматизированного инвентарного контроля, а также напрямую из диагностических программных средств [10].

Процесс поиска уязвимостей осуществляется с использованием алгоритмов сопоставления по имени программного обеспечения, версии и другим уникальным характеристикам.

Для каждой найденной уязвимости проводится анализ ее критичности.

На данном этапе определяются возможные сценарии эксплуатации уязвимости, ее потенциальное влияние на целостность, конфиденциальность и доступность информации.

После завершения анализа уязвимостей составляется отчет, содержащий: общие сведения о компоненте информационной системы; перечень выявленных уязвимостей с указанием их идентификаторов (CVE), уровней критичности (по CVSS), потенциальных последствий и методов эксплуатации; оценку вероятности атаки и ее возможного воздействия на информационную систему; рекомендации по устранению уязвимостей (установка обновлений, конфигурационные изменения, применение компенсирующих мер). Выводы и рекомендации по дальнейшим действиям.

Заключительный раздел отчета содержит обобщенные выводы по анализируемому компоненту, рекомендации по его обновлению или модификации, а также возможные меры по снижению рисков в случае невозможности оперативного устранения уязвимостей.

Формирование локального отчета об уязвимостях обеспечивает структурированный подход к управлению безопасностью автоматизированных систем, позволяет своевременно выявлять и устранять уязвимости, минимизируя вероятность их эксплуатации злоумышленниками. Внедрение автоматизированных механизмов генерации таких отчетов значительно повышает оперативность реагирования на угрозы и способствует повышению общего уровня защищенности информационной инфраструктуры [8]. Алгоритм формирования локального отчета, об уязвимостях компонента информационной (автоматизированной) системы представлен на рисунке 1.

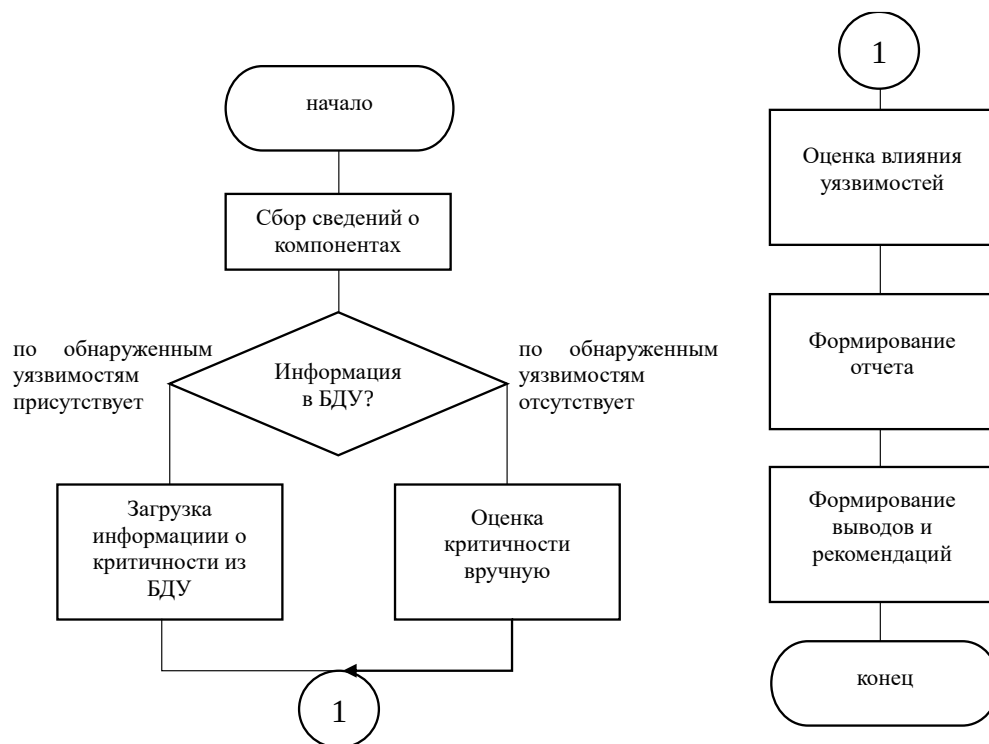


Рис. 1. Алгоритм формирования локального отчета об уязвимостях компонента информационной (автоматизированной) системы

2. Формирование отчета об уязвимостях всей информационной (автоматизированной) системы.

Формирование отчета об уязвимостях информационной (автоматизированной) системы является неотъемлемой частью процесса управления ее защищенностью. Данный отчет представляет собой комплексный документ, содержащий сводную информацию о выявленных уязвимостях всех компонентов системы, их оценку с точки зрения потенциальных рисков и рекомендации по минимизации угроз. Основой для формирования итогового отчета служат локальные отчеты об уязвимостях отдельных элементов системы, включая программное обеспечение, аппаратные средства и сетевую инфраструктуру.

На первом этапе выполняется сбор информации из локальных отчетов, содержащих сведения о выявленных уязвимостях отдельных компонентов системы. Локальные отчеты включают: перечень исследованных элементов инфраструктуры; версии программного обеспечения и аппаратных средств; результаты анализа уязвимостей, включая идентификаторы (CVE) и их критичность (CVSS); возможные способы эксплуатации уязвимостей и их потенциальное влияние на функционирование системы.

Полученные данные консолидируются, при этом устраняются дублирующие записи, проводится унификация информации по единому стандарту и классификация выявленных угроз.

На основе агрегированных данных выполняется комплексный анализ критичности уязвимостей, учитывающий их влияние на всю информационную систему. В отличие от локального анализа, в данном случае рассматриваются межкомпонентные связи, которые могут усилить воздействие уязвимостей. Например, низкоуровневая уязвимость в одном из узлов сети может использоваться злоумышленником для достижения критических сегментов системы.

Для оценки критичности уязвимостей применяются:

1. Индивидуальная оценка по метрикам CVSS – определение уровня угрозы каждой уязвимости на основе ее характеристик;
2. Анализ сценариев атаки – выявление возможных последовательных шагов злоумышленника по компрометации системы;
3. Корреляционный анализ – выявление взаимосвязей между уязвимостями, позволяющих злоумышленнику комбинировать методы атаки.

Следующий этап – анализ возможных последствий эксплуатации выявленных уязвимостей. Для этого используются:

1. Модели оценки ущерба (например, на основе методик FMEA – Failure Mode and Effects Analysis);
2. Прогностические методы (например, на базе теории серых систем), позволяющие определить вероятность эксплуатации уязвимостей в зависимости от динамики их обнаружения и исправления;
3. Исторические данные об атаках – анализ ранее зафиксированных инцидентов, связанных с аналогичными уязвимостями.

На основании проведенного анализа составляется сводный отчет, включающий:

1. Общую информацию о системе – ее конфигурацию, архитектурные особенности и критически важные компоненты;
2. Перечень выявленных уязвимостей – их идентификаторы, уровень критичности, возможные сценарии эксплуатации;
3. Результаты оценки рисков – влияние уязвимостей на конфиденциальность, целостность и доступность информации;
4. Приоритетные меры реагирования – рекомендации по устранению уязвимостей, их ранжирование по степени срочности и эффективности.

Финальным этапом является разработка стратегии устранения выявленных уязвимостей. В зависимости от их характера возможны следующие меры: немедленное устранение (установка обновлений, изменение конфигурации); компенсирующие меры (ограничение прав доступа, изоляция уязвимого компонента); долгосрочные стратегии (разработка новых политик безопасности, переход на альтернативные решения).

Формирование отчета об уязвимостях информационной системы позволяет не только выявлять потенциальные угрозы, но и принимать обоснованные управленческие решения в области обеспечения информационной безопасности. Интеграция автоматизированных механизмов анализа уязвимостей и переход к динамическому обновлению данных об угрозах обеспечивают более высокий уровень защиты и снижает риски эксплуатации уязвимостей в критически важных системах. Алгоритм формирования отчета, об уязвимостях информационной (автоматизированной) системы представлен на рисунке 2.

Формализация алгоритмов на основе использования диаграмм унифицированного языка моделирования. Для наглядного изображения процессов и визуализации модели функционирования приведенных алгоритмов предлагается использовать унифицированный язык моделирования.

Диаграммы унифицированного языка моделирования, или UML-диаграммы, являются инструментом для представления сложных систем и процессов [9]. Они обеспечивают формальный способ описания структуры и поведения системы, делая ее более доступной для анализа, проектирования и разработки. В рамках настоящей работы предлагается привести следующие диаграммы: диаграмма вариантов использования, диаграмма состояний, диаграмма последовательности, диаграмма компонентов.

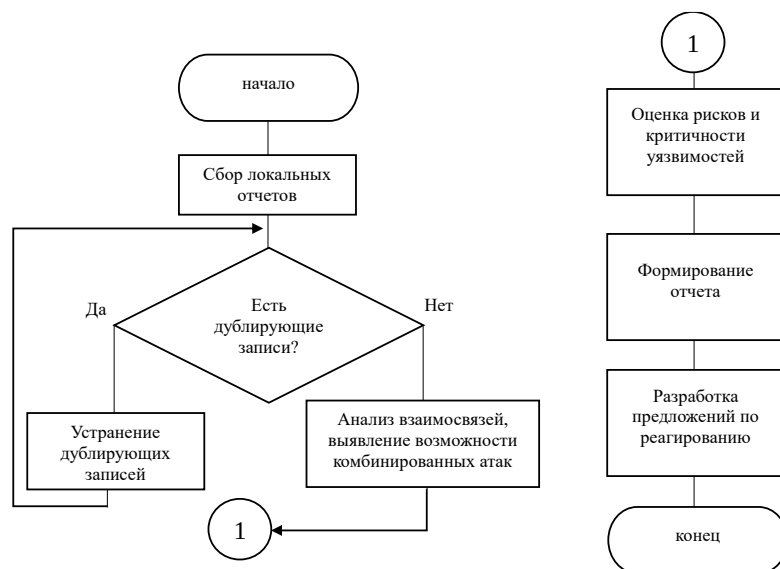


Рис. 2. Алгоритм формирования отчета, об уязвимостях информационной (автоматизированной) системы

Для описания процессов формирования локального отчета об уязвимостях программного и аппаратного обеспечения, входящего в состав информационной (автоматизированной) системы и формирования отчета об уязвимостях всей информационной (автоматизированной) системы наиболее подходящими будут следующие диаграммы:

1. Диаграмма вариантов использования.
2. Диаграмма деятельности.
3. Диаграмма классов.
4. Диаграмма последовательности.

Перейдем непосредственно к описанию указанных диаграмм для обоих алгоритмов.

Для процессов формирования локального отчета об уязвимостях программного и аппаратного обеспечения, входящего в состав информационной (автоматизированной) системы на рисунках 3-6 представлены описанные выше диаграммы.



Рис. 3. Диаграмма вариантов использования (для алгоритма 1)

По приведенной диаграмме вариантов использования (рисунок 3) необходимо привести следующие пояснения:

Сущностями (actors) в данном случае выступают:

1. Аналитик – пользователь системы, который инициирует процесс сбора сведений, оценки уязвимостей и формирования отчета.

2. База данных уязвимостей (БДУ) – внешний источник, из которого система может получать информацию об уязвимостях (идентификаторы, критичность и т.д.).

Варианты использования в соответствии с приведенной информацией:

- аналитик указывает, какие именно компоненты системы нужно проверить;
- система обращается к базе уязвимостей, чтобы найти информацию об обнаруженных уязвимостях;
- получение или уточнение уровня критичности уязвимостей (из БДУ, либо вручную, если данных нет);
- анализ, как данные уязвимости влияют на систему (риски, последствия);
- итоговый отчет, в котором перечислены уязвимости, их критичность, последствия и т.д.;
- выработка рекомендаций по устранению или смягчению уязвимостей и финальные выводы.



Рис. 4. Диаграмма деятельности (для алгоритма 1)

Перейдем к описанию диаграммы деятельности (рисунок 4). Начальным этапом является сбор сведений о компонентах, где определяется перечень компонентов для проверки. Далее происходит проверка наличия информации об уязвимостях в БДУ, т.е. определяется, доступны ли данные в базе. Если данные доступны, происходит загрузка информации о критичности; если нет, проводится оценка вручную. Завершающими шагами процесса являются оценка влияния, формирование отчета, выводы и рекомендации.

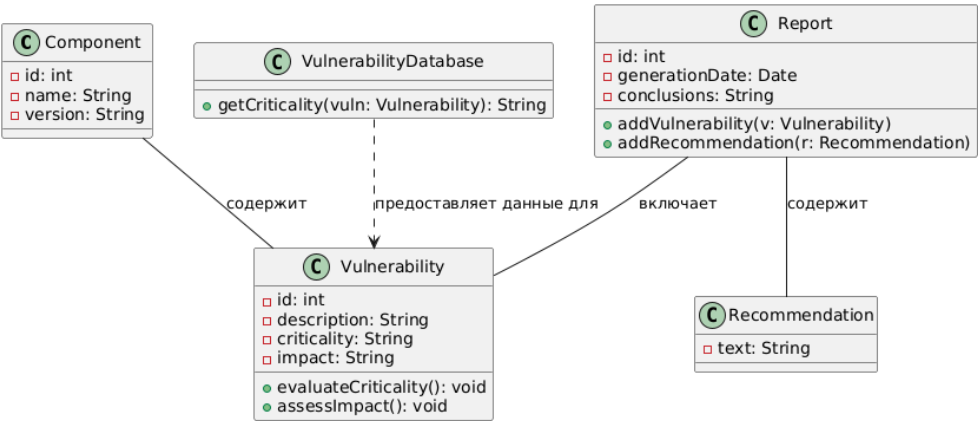


Рис. 5. Диаграмма классов (для алгоритма 1)

Опишем подробнее структуру диаграммы классов (рисунок 5). Приведем описание используемых классов:

Component – описывает проверяемый компонент (например, модуль или библиотеку).

Vulnerability – отражает уязвимость, найденную в компоненте, с атрибутами для описания, оценки критичности и влияния.

VulnerabilityDatabase – представляет внешний источник (БДУ), откуда может загружаться информация о критичности уязвимостей.

Report – агрегирует выявленные уязвимости и рекомендации, формируя итоговый отчет.

Recommendation – содержит текст рекомендаций по устранению или смягчению уязвимостей.

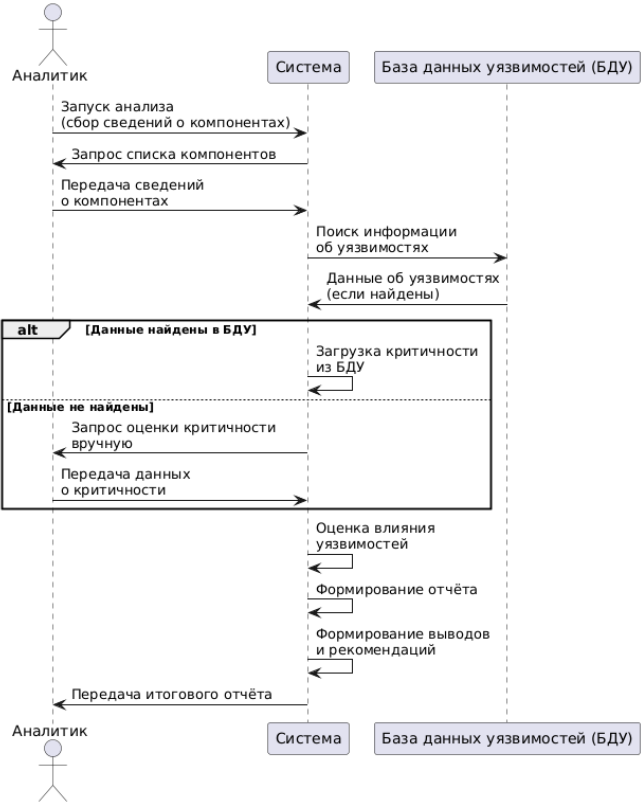


Рис. 6. Диаграмма последовательности (для алгоритма 1)

Последней UML-диаграммой, которую опишем, будет диаграмма последовательности (рисунок 6).

Участниками процессов являются аналитик (пользователь, инициирующий процесс анализа), система (основной «исполнитель», который собирает сведения, взаимодействует с БДУ и формирует отчет), а также БДУ.

В соответствии с рисунком 6 можно описать основной сценарий:

Шаг 1. Аналитик запускает процесс анализа.

Шаг 2. Система запрашивает у Аналитика сведения о компонентах, получает их.

Шаг 3. Система обращается к БДУ, чтобы найти соответствующие данные об уязвимостях.

Шаг 4. В зависимости от результатов запроса к БДУ:

Шаг 5. Если данные об уязвимостях (и их критичность) есть, система загружает их.

Шаг 6. Если нет, система запрашивает у Аналитика ручную оценку критичности.

Шаг 7. После этого система оценивает влияние уязвимостей, формирует отчет и рекомендации.

Шаг 8. Итоговый отчет передается Аналитику.

Для процессов формирования отчета об уязвимостях всей информационной (автоматизированной) системы на рисунках 7-10 представлены аналогичные алгоритму 1 диаграммы.



Рис. 7. Диаграмма вариантов использования (для алгоритма 2)

На диаграмме вариантов использования (рисунок 7) приведены следующие варианты использования системы:

- аналитик загружает локальные отчёты в систему;
- система анализирует отчёты на предмет дублирования;
- система удаляет дубликаты, при их наличии;
- при отсутствии дубликатов система выявляет скрытые взаимосвязи;
- оценка потенциального вреда;
- подготовка отчетов;
- генерация рекомендаций по реагированию на различные воздействия;
- получение итогового отчёта.



Рис. 8. Диаграмма деятельности (для алгоритма 2)

Далее при рассмотрении алгоритма в данном случае диаграмма деятельности (рисунок 8) является усовершенствованием блок-схемы и отображает следующие итерации:

1. Процесс начинается со сбора локальных отчетов.
2. Проверяется, есть ли дублирующие записи: если есть, то система удаляет их, если нет, проводится анализ взаимосвязей и комбинированных атак.
3. Далее оцениваются риски и критичность уязвимостей.
4. Формируется итоговый отчет.
5. Разрабатываются предложения по реагированию.
6. Процесс завершается.

Для описания диаграммы классов (рисунок 9) приведем описание используемых классов:

- LocalReport – локальный отчет.
- DuplicateRecord – дублирующая запись (если найдены повторы).
- AnalysisResult – результат анализа взаимосвязей.
- Vulnerability – уязвимость (описывается в отчете).
- ConsolidatedReport – итоговый отчет, объединяет данные.
- Recommendation – предложения по реагированию.

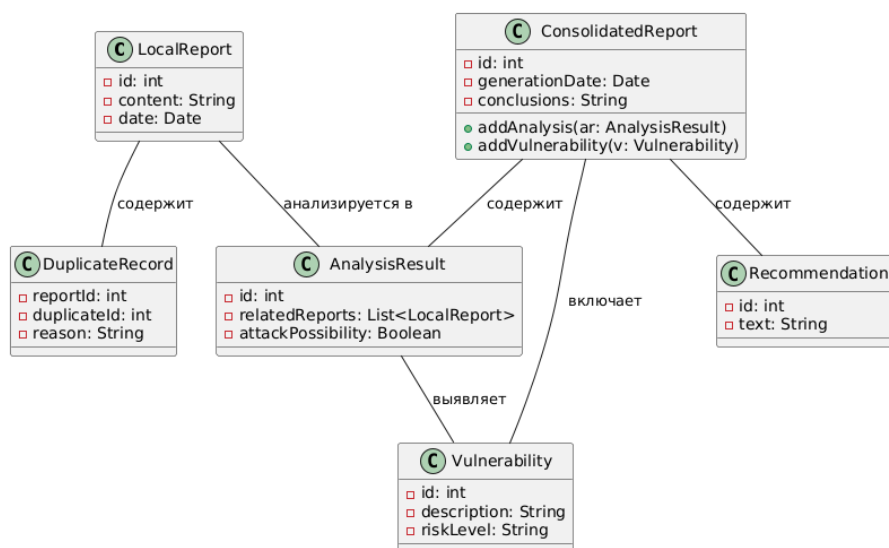


Рис. 9. Диаграмма классов (для алгоритма 2)

Аналогично предыдущему случаю опишем диаграмму последовательности (рисунок 10). Приведем описание шагов в рассматриваемой диаграмме:

Шаг 1. Аналитик загружает локальные отчеты, которые сохраняются в базе данных.

Шаг 2. Система проверяет на дублирующиеся записи:

Если дубликаты есть, они устраняются.

Если дубликатов нет, проводится анализ взаимосвязей и выявление комбинированных атак.

Шаг 3. Оценка рисков и критичности уязвимостей.

Шаг 4. Формирование итогового отчета.

Шаг 5. Разработка рекомендаций.

Шаг 6. Аналитик получает итоговый отчет.

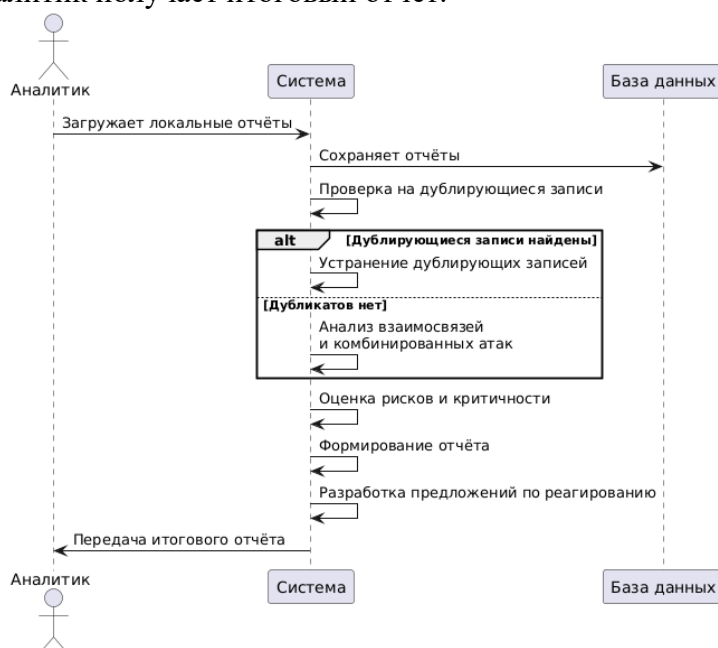


Рис. 10. Диаграмма последовательности (для алгоритма 2)

Выводы. Таким образом, в настоящей статье описана разработка алгоритмов и моделей, обеспечивающих автоматизацию процесса сбора, обработки и анализа информации о выявленных уязвимостях программного обеспечения. В рамках исследования рассмотрены вопросы интеграции данных технического паспорта автоматизированной системы с внешними базами уязвимостей, разработаны алгоритмы автоматизированного поиска и идентификации уязвимых версий ПО, а также сформированы модели обработки данных, основанные на принципах анализа взаимосвязанных объектов. Полученные результаты могут быть использованы при построении систем поддержки принятия решений в области информационной безопасности, позволяя повысить эффективность управления рисками, связанными с эксплуатацией уязвимого программного обеспечения в целях решения задач управления и принятия решений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. The MITRE Corporation. Common Vulnerabilities and Exposures (CVE) [Электронный ресурс]. – URL: <https://cve.mitre.org> (дата обращения 20.02.2025).
2. National Institute of Standards and Technology. National Vulnerability Database (NVD) [Электронный ресурс]. – URL: <https://nvd.nist.gov> (дата обращения 20.02.2025).
3. Банк данных уязвимостей ФСТЭК России (БДУ ФСТЭК) Федеральная служба по техническому и экспортному контролю. Банк данных угроз безопасности информации [Электронный ресурс]. – URL: <https://bdu.fstec.ru> (дата обращения 20.02.2025).
4. Menshikh, V. V. Simulating the Evaluation of Survivability of Ergatic Systems Based on the Use of Weighted Hypergraphs / V. V. Menshikh, G. I. Zverev // XXI International Conference "Complex Systems: Control and Modeling Problems" (CSCMP) : Proceedings, Samara, 03–06 сентября 2019 года. – Samara: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019. – P. 541-544. – DOI 10.1109/CSCMP45713.2019.8976840.
5. Zverev, G. I. Optimizing the selection of combination of alternative functions of ergatic system multifunctional elements / G. I. Zverev, V. V. Menshikh // Journal of Physics: Conference Series, Voronezh, 11–13 ноября 2019 года. – V. 1479. – Voronezh: IOP Publishing Ltd, 2020. – P. 012062. – DOI 10.1088/1742-6596/1479/1/012062.
6. Приказ ФСТЭК России от 29.04.2021 № 77 Федеральная служба по техническому и экспортному контролю. Приказ от 29 апреля 2021 г. № 77 «Об утверждении требований по безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» [Электронный ресурс]. – URL: <https://fstec.ru> (дата обращения 20.02.2025).
7. Наседкина, В. С. Описание структурно-функциональных моделей проектируемых систем защиты информации в интересах оптимизации их состава / В. С. Наседкина, Г. И. Зверев // Вестник Воронежского института МВД России. – 2023. – № 2. – С. 138-144.
8. Зверев, Г. И. Актуальность использования метрик семантической близости для повышения уровня защищенности автоматизированных систем специального назначения / Г. И. Зверев, В. С. Карпова // Вестник Воронежского института МВД России. – 2024. – № 1. – С. 86-94.
9. Основные этапы проектирования автоматизированной системы интеллектуального поиска мест наркотических закладок по открытым источникам / Г. И. Зверев, С. А. Мишин, М. В. Бутова, Ю. В. Биктимирова // Вестник Воронежского института МВД России. – 2024. – № 4. – С. 70-78.
10. Pillala, G. Fortifying the Digital Bastion: Pioneering Cybersecurity with Dynamic Secrets Management and CMDB Fusion in the Enterprise / G. Pillala // Journal of Information Security. – 2024. – V. 15. – №. 4. – С. 411-418.
11. Атаки и методы защиты в системах машинного обучения: анализ современных исследований / И. В. Котенко, И. Б. Саенко [и др.] // Вопросы кибербезопасности. – 2024. – № 1(59). – С. 24-37. – DOI 10.21681/2311-2024-1-24-37.
12. Иваненко, В. Г. Оценка рисков информационной безопасности автоматизированных систем управления технологическим процессом / В. Г. Иваненко, Н. Д. Иванова // Вопросы кибербезопасности. – 2024. – № 1(59). – С. 116-123. – DOI 10.21681/2311-3456-2024-1-116-123.

13. Обоснование показателя для оценки управляемости защищенностью информации в автоматизированных системах управления критических приложений от воздействия вредоносного программного обеспечения / С. В. Скрыль, П. А. Федюнин, Т. В. Мещерякова, Р. А. Хворов // Безопасность информационных технологий. – 2024. – Т. 31, № 2. – С. 30-41. – DOI 10.26583/bit.2024.2.01.
14. Скрыль, С. В. О возможности совершенствования процедур количественной оценки защищенности информации объектов критической информационной инфраструктуры от угроз несанкционированного доступа / С. В. Скрыль, А. А. Ицкова, К. Е. Ушаков // Безопасность информационных технологий. – 2024. – Т. 31, № 3. – С. 94-104. – DOI 10.26583/bit.2024.3.04.
15. Ефимов, А. О. Прогнозирование количества выявляемых уязвимостей информационной безопасности на основе теории «серых систем» / А. О. Ефимов, С. А. Мишин, Е. А. Рогозин // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2023. – Т. 50, № 3. – С. 72-82. – DOI 10.21822/2073-6185-2023-50-3-72-82.
16. Ефимов, А. О. Оценка уровня защищенности (безопасности функционирования) автоматизированных систем на основе их уязвимостей, формализованная при помощи теории систем массового обслуживания / А. О. Ефимов, Е. А. Рогозин // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2023. – Т. 50, № 2. – С. 83-89. – DOI 10.21822/2073-6185-2023-50-2-83-89.
17. Концептуальные основы оценки уровня защищенности автоматизированных систем на основе их уязвимости / А. О. Ефимов, И. И. Лившиц, Т. В. Мещерякова, Е. А. Рогозин // Безопасность информационных технологий. – 2023. – Т. 30, № 2. – С. 63-79. – DOI 10.26583/bit.2023.2.04.
18. Ефимов, А. О. Меры защиты планшетных компьютеров, осуществляющих обработку конфиденциальной информации, от несанкционированного доступа / А. О. Ефимов, Т. В. Мещерякова, Е. А. Рогозин // Вестник Воронежского института МВД России. – 2023. – № 2. – С. 31-38.
19. Мещерякова, Т. В. Теоретические основания для разработки методического аппарата оптимизации процедур технического контроля эффективности защиты информации от утечки по техническим каналам / Т. В. Мещерякова, А. И. Бороненков, С. А. Гришин // Вестник Воронежского института МВД России. – 2023. – № 3. – С. 96-104.
20. Звягинцева, А. В. Выявление взаимосвязи сложных событий на примере анализа статистических данных о чрезвычайных ситуациях / А. В. Звягинцева, Т. К. Гучмазова, Р. В. Клеменюк // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2024. – № 3. – С. 45-54. – DOI 10.5281/zenodo.14018559. – EDN QAUAIK.
21. Пономарев, Д. С. Разработка систем сравнительного анализа ключевых параметров эффективности производственного сектора при помощи языка Python / Д. С. Пономарев, М. М. Горохов // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2024. – № 3. – С. 75-82. – DOI 10.5281/zenodo.14018612. – EDN UOJKMB.

Поступила в редакцию 07.03.2025 г., рекомендована к печати 28.03.2025 г.

**AUTOMATION OF PROCESSING OF INFORMATION ON IDENTIFICATION OF SOFTWARE
VULNERABILITIES FOR THE PURPOSE OF SOLVING MANAGEMENT AND DECISION-
MAKING PROBLEMS**

Zverev G.I., Efimov A.O.

The article considers the issue of automation of the processes of collection, processing and analysis of information on identified software vulnerabilities in order to ensure effective management of information security of automated systems. A formalized procedure for correlating the data of the technical passport of an automated system containing information on the installed software with the data of specialized vulnerability databases is proposed. Methods of automated collection of information on software versions are described, and algorithmic models and UML diagrams describing the sequence of processes of identification, classification and interpretation of identified vulnerabilities are presented. The issues of integration of the proposed methodology into decision support systems providing adaptive monitoring of the security status and risk management associated with the operation of vulnerable software are considered. The presented approach is aimed at increasing the efficiency of processing vulnerability data, minimizing the time spent on their analysis and increasing the accuracy of forecasting possible information security threats in order to solve management and decision-making problems.

Keywords: vulnerabilities, software, algorithms, UML-models, management, decision making.

Зверев Георгий Игоревич

кандидат технических наук, заместитель
начальника кафедры автоматизированных
информационных систем органов внутренних дел
ФГКОУ ВО «Воронежский институт
Министерства внутренних дел Российской
Федерации».

Российская Федерация, г. Воронеж.

E-mail: geozver@ya.ru

Zverev Georgii Igorevich

Candidate of Technical Sciences, Deputy Head of
the Department of Automated Information Systems
of Internal Affairs Bodies of the Voronezh Institute
of the Ministry of Internal Affairs of the Russian
Federation.

Russian Federation, Voronezh.

Ефимов Алексей Олегович

преподаватель кафедры автоматизированных
информационных систем органов внутренних дел
ФГКОУ ВО «Воронежский институт
Министерства внутренних дел Российской
Федерации».

Российская Федерация, г. Воронеж.

E-mail: ea.aleksei@ya.ru

Efimov Aleksei Olegovich

Lecturer at Department of Automated Information
Systems of Internal Affairs Bodies of the Voronezh
Institute of the Ministry of Internal Affairs of the
Russian Federation.

Russian Federation, Voronezh.

E-mail: ea.aleksei@ya.ru

АНАЛИЗ ПРОТОКОЛОВ СВЯЗИ ДЛЯ АВТОНОМНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ, ВЫПОЛНЯЮЩИХ СОВМЕСТНЫЙ ПОЛЕТ

© 2025 Куижева С.К., Довгаль В.А.

Система связи является важнейшей частью системы проектирования автономного беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Она должна учитывать различные факторы, включая эффективность, надежность и мобильность БПЛА. В статье дан анализ протоколов, поддерживающих технологию беспроводной связи группы беспилотников, обсуждаются ячеистые сети. Целью статьи является обзор полного стека коммуникационных протоколов для БПЛА, применяющихся для обмена данными в процессе выполнения полета.

Ключевые слова: сетевая система управления, модель сетевой системы управления, беспроводные технологии, автономная система, беспилотный летательный аппарат, рой дронов, беспроводная коммуникационная ячеистая сеть.

Введение. Активное использование автономных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является актуальной темой для текущего момента. Дроны, согласно многим исследованиям, перспективны для применения благодаря большому потенциалу экономии средств.

Национальная стратегия развития беспилотной авиации (БПА) определяет ее, как отрасль экономики, развивающуюся и связанную с разработкой, производством и эксплуатацией беспилотных авиационных систем (БАС), оказывающих услуги и неоценимую помощь, связанные с выполнением авиационных работ на основе автоматизированных полетов.

Большинство современных примеров использования летательных аппаратов в поисковых миссиях осуществляется с помощью управления одним БПЛА [1, 2]. В последнее время чаще говорят об использовании нескольких БПЛА для повышения эффективности за счет совместной работы [3]. Кроме того, рой дронов часто должен выполнять заданную миссию за пределами прямой видимости, но можно осуществлять его координацию и на дальних расстояниях [4].

Воздушный кодекс Российской Федерации и Федеральные правила использования воздушного пространства Российской Федерации определяет правовые основы обеспечения единой безопасности воздушного пространства. Кроме того, имеются несколько государственных стандартов (например, [5]), которые устанавливают требования к функциональным свойствам БПЛА, охватывающей регулирование всех гражданских БПЛА. Система связи автономной системы БПЛА, поддерживающая нормативные требования, должна обеспечивать надежный поток мониторинго-управляемого взаимодействия всех летательных аппаратов роя на основе дополнительных механизмов повышения отказоустойчивости при возникновении различных коммуникационных проблем.

Статья подготовлена при поддержке гранта ФГБОУ ВО «МГТУ» № НП11 от 2024 г. «Единое интеллектуальное информационное пространство региона как фактор его устойчивого и эффективного развития».

Материалы и методы. Для анализа протоколов связи, используемых для обмена данными группой автономных беспилотных летательных аппаратов, выполняющих совместный полет применялись подход теории управления, методы дискретной и вычислительной математики, теории графов, теории вероятностей, теории защиты информации, методы математического и численного моделирования, системный анализ, статистические методы (в частности корреляционный анализ), теории группового управления, теории нелинейного управления, теории адаптивного управления, компьютерного моделирования. Для проведения компьютерного моделирования и обработки экспериментальных данных были использованы программные комплексы MathCad, а также специально разработанные программы для персональных компьютеров на языках программирования Python и C#.

Литературный обзор. Существует достаточно большое количество работ, изучающих способы взаимодействия беспилотных летательных аппаратов. В качестве примера можно назвать работы А. Гильен-Переса, Р. Санчес-Иборры, М. Кано, Дж.С. Санчес-Арнуце и Дж. Гарсия-Аро, в которых для организации связи беспилотных летательных аппаратов рассматривается применение сетей Wi-Fi, соответствующих стандарту IEEE 802.11. Кроме того, используемая для передачи информации между дронами и контроллером наземной станции сеть является уязвимой для нарушений безопасности из-за ее особенностей. Отсутствие шифрования на бортовых чипах беспилотников или выполнение злоумышленником атаки «человек-в-середине» позволяет захватить управление летательным аппаратом на значительном расстоянии (такая скрытая атака в сетях Wi-Fi рассмотрена в работах Агарвал М., Бисвас С., Нанди С.). Потеря контроля над дронами в результате применяемого злоумышленниками спуфинга GPS, а также вопросы реализации методов защиты от него рассмотрены в работах Д. Матвеева, Е.С. Басан, Е.С. Абрамова, А.Г. Басюка и Н.А. Сушкина. Жизненно важную информацию злоумышленники могут получить от беспилотных летательных аппаратов с помощью сетевых эксплойтов и атак на основе вредоносных программ. В частности, борьбе с атакой подмены управляющего сигнала в системах беспилотных летательных аппаратов посвящены работы китайских ученых Хуан К. и Ван Х.

В исследованиях, проведенных Дж. Милликен, В. Селис, К.М. Яп, А. Маршалл проведено влияние выбора метрики на эффективность DOS-атак беспроводной деаутентификации. Эмпирический анализ уязвимости протоколов, используемых для атак на беспилотные летательные аппараты описан в статьях зарубежных ученых Ю. Квон, Дж. Ю, Б. Чо, Ю. Ын, К. Парк.

Работы Л.Р. Клебанова и С.В. Полубинской посвящены компьютерным технологиям в совершении преступлений диверсионной и террористической направленности. В свою очередь Плешков А.С. и Рудер Д.Д. провели тестирование на проникновение для анализа защищенности компьютерных систем.

Анализу атак на роботизированную операционную систему, а также практической разработке автоматизированной системы обнаружения вредоносного программного обеспечения для оперативного отражения неизвестных ранее антивирусных угроз, занимаются Бабенко Л.К. и Макаревич О.Б.

Имеющая связь с наземной станцией группа дронов, является информационной системой, поэтому в процессе разработки такой системы будут появляться противоречия, исследованные в работах Рогозова Ю.И. Основными компонентами информационно-управляющих систем для исследования состояний внешней среды являются информационная модель, в структуре которой можно классифицировать задачи анализа экологической информации и программного обеспечения.

Результаты. Выполнена классификация литературы по типу канала связи БПЛА и технологиям беспроводного доступа, проведен обзор исследований, касающихся протоколов беспроводных ячеистых сетей, предназначенных для применения в БПЛА; выполнен анализ различных роботизированных промежуточных программ с точки зрения связи, осуществлена оценка их потенциальных преимуществ, архитектуры и интерфейсов прикладного программирования (API).

Научная новизна: систематизированы методы защиты информации с точки зрения применения модели сетевой системы управления применительно к задаче защиты информации. Классифицированы стратегии развертывания роев дронов с целью описания линий связи, необходимых для взаимодействия, а также составляющих для обеспечения их работы и применяемых алгоритмов; выполнен анализ стека протоколов для системы из нескольких дронов; выполнен анализ эффективности применения роем дронов основных беспроводных протоколов.

Обсуждение. Рой беспилотников ориентирован на выполнение некоторой поставленной задачи (миссии) с различными масштабами и сложностью, в процессе которых решаются три подзадачи: автономный полет, связь и координация, анализ полученных данных. При автономном полете [6] решаются задачи формирования маршрута, осуществления навигации и управления беспилотником в окружающей среде с помощью камер.

Рассмотрим наиболее часто применимые для выполнения совместного полета беспроводные технологии.

1. Сотовые сети 3GPP

Стандарт сетей сотовой связи третьего поколения (3G) – это технические требования, непротиворечащих технологий и услуг сотовой связи. Например, восьмой выпуск спецификаций 3GPP устанавливает базовые параметры сетей 4G, версия 12 от 2012 г. устанавливает спецификации сервисов, доступных в непосредственной близости устройств (Proximity Services, ProSe) [7,8]. Версия 13 описывает стандарты широкополосной радиосвязи с низким энергопотреблением 3GPP Интернета вещей (IoT) [9], а версия 15 от 2018 года – технологию 5G для объединения в сеть воздушных судов. 5G New Radio (5G NR) – стандарт связи, разработанный для поддержки широкого спектра потребительских и промышленных приложений (и роя дронов в частности) за счет более широкой полосы пропускания каналов, а также расширенных схем агрегации несущих частот при их одновременном расширении до диапазона миллиметровых волн, увеличивающих количество доступных радиоресурсов, 5G NR поддерживает каналы шириной от 5 до 100 МГц (с шагом в 5 МГц) на частотах до 7.125 ГГц (FR1) и 50, 100, 200, 400 МГц на частотах выше 24.25 ГГц (FR2) (в России используется полоса частот 20 МГц) [10]. Коммуникационная инфраструктура с поддержкой 5G предназначена для выполнения для полетов, которые выполняются за пределами видимости пилота BVLOS (в отличие от полетов по ПВП – Правилам Визуального Полета или полетов по VLOS, которые выполняются в зоне видимости пилота). В режиме BVLOS дроном можно управлять на расстоянии до 6 миль от обслуживающей базовой станции сотовой связи и на высоте до 120 м над землей (согласно отчету Qualcomm) [11]. Кроме того, спецификации 5G обеспечивают приложениям, управляющих беспилотниками с меньшей задержкой и высокой скоростью передачи данных [12].

2. Беспроводные локальные вычислительные сети

Беспроводная связь Wi-Fi и WLAN используют нелицензионный диапазон частот 5,8 ГГц (стандарт a) и 2,4 ГГц (стандарты b/g) [13]. Традиционно в системах БПЛА применяются следующие стандарты [14]:

- стандарт IEEE 802.11a – скорость соединения до 54 Мбит/с, используя мультиплексирование с ортогональным частотным разделением (orthogonal frequency-division multiplexing, OFDM);

- стандарт IEEE 802.11b – скорость передачи до 11 Мбит/с (с отставанием до 5,5, 2 и 1 Мбит/с) в диапазоне 2,4 ГГц. и использующий расширенный спектр прямой последовательности (DSSS);

- стандарт IEEE 802.11g с максимальной скоростью передачи данных 54 Мбит/с и работающей на частоте 2,4 ГГц (для построения высокоскоростной беспроводной локальной сети);

- стандарт IEEE 802.11n с диапазонами 2,4 или 5,0 ГГц обеспечивает эффективное использование доступной полосы пропускания, реализованной на подуровне Media Access Control (MAC). Стандартом поддерживается усовершенствованная обработка сигнала и модуляция, реализованная на физическом уровне (PHY), и используется Multiple Input Multiple Output (MIMO) для одновременного использования разнесенных передающей и приемной антенн;

- стандарт IEEE 802.11p, включающий беспроводной доступ в транспортных средах (Wireless Access in Vehicular Environments, WAVE) в диапазоне частот 5,9 ГГц (5,85–5,925 ГГц) и используемый приложениями Vehicle-to-Everything (V2X), который является беспроводной технологией взаимодействия транспортных средств для обеспечения лучшей поддержки различных интеллектуальных транспортных услуг и приложений с непосредственным окружением, таких как другие транспортные средства (V2V), придорожная инфраструктура, такая как плата за проезд (V2I), пешеходы (V2P) и т.п.;

- стандарт IEEE 802.11s применяется для создания беспроводной ячеистой системы нескольких взаимодействующих точек доступа без использования большей мощности сигнала в целях увеличения радиуса работы беспроводной сети и обеспечения хорошего уровня сигнала, (преимуществами ячеистых систем является обеспечение хорошего уровня сигнала, гибкость – легкое добавление новых узлов в сеть и расширение ее радиуса действия, легкое управление сетью, высокий уровень отказоустойчивости и балансировки нагрузки, оптимизированные соединения, а также уменьшение задержки при переключении на другой узел;

- стандарт IEEE 802.11ah обеспечивает бесшовную связь между крупномасштабными и энергоэффективными узлами датчиков (исполнительных механизмов) в Интернете за счет таких ключевых функций, как окно ограниченного доступа (Restricted Access Window, RAW), иерархической карты индикации трафика (Hierarchical Traffic Indication Map, TIM) и идентификатора ассоциации (Association Identifier, AID) для эффективного планирования и идентификации устройств, а также нескольких схем модуляции и кодирования (Modulation and Coding Schemes, MCS) для адаптивной передачи данных, которая улучшает возможности подключения IoT-приложений, путем расширения диапазона за счет поддержки субгигагерцевого диапазона и MIMO.

3. Беспроводные персональные сети.

Аксессуары для БПЛА используют стандарт IEEE 802.15.4, предназначенный для создания маломощных и недорогих персональных вычислительных сетей с поддержкой связи Device-to-Device (D2D) в сетях сотовой связи – это недорогая технология беспроводного доступа с низкой скоростью передачи данных для устройств, работающих от батарей, определяющий уровни MAC и PHY для низкоскоростных беспроводных персональных сетей (LR-WPAN), а также использующийся как среда, применяющая широкий спектр сетевых протоколов, включая ZigBee, 6lowPAN и TinyOS.

С другой стороны, стандарт IEEE 802.15.4 со сверхширокополосным подключением (Ultra Wideband, UWB, известный как IEEE 802.15.4a) поддерживает более высокую скорость передачи данных, чем стандарт 802.15.4 2006 года. Сверхширокая полоса несущего сигнала беспроводной технологии связи UWB позволяет передавать данные на небольшие расстояния при крайне низком энергопотреблении. Такая особенность UWB-связи определяется особенностью механизма передачи, заключающегося в том, что используется серия коротких импульсов (длительностью ≈ 1 нс). Чем шире его спектр и короче импульс, тем большая (в сравнении с узкополосной связью) ширина полосы требуется для таких импульсов.

Кроме того, технология обладает крайне низким, близким по силе к радиошуму, уровнем сигнала, благодаря чему UWB не вызывает помех для других традиционных видов радиосвязи. Например, сверхширокополосный приемо-передатчик DecaWave, произведенный компанией Qorvo и применяющий технологию импульсной радиосвязи UWB, обеспечивает измерение расстояния/местоположения с сантиметровой точностью и безопасную передачу данных с малой задержкой и низким энергопотреблением, обеспечивая максимальную скорость передачи данных до 6,8 Мбит/с и расширение дальности связи до 290 м при скорости передачи данных 110 Кбит/с и частоте ошибок пакетов 10% [15].

В экспериментальном исследовании [16] представлено сравнение сверхширокой полосы пропускания (СШПП) в сравнении с маломощной, недорогой и надежной технологией беспроводной связи ZigBee, основанной на стандарте 802.15.4 и широко используемой в устройствах IoT, позволяющей устройствам общаться друг с другом по беспроводной связи. В условиях многолучевого распространения внутри помещений UWB превосходит ZigBee по дальности действия, скорости передачи данных и скорости потери пакетов. Для каналов распространения технология Air-to-ground (A2G), являющимся каналом связи типа "воздух-земля" для беспилотных летательных аппаратов также была исследована модель СШП-канала для определения потерь на трассе, многолучевости и характеристик каналов A2G на различных расстояниях и высотах полета БПЛА [17]. СШП-устройства широко используются для предоставления услуг определения местоположения внутри помещений, но об использовании для связи дронов между собой имеется ограниченное количество исследований.

Ограничения СШП-устройств связаны с действующими нормативными актами. Для контроля создаваемых СШП-устройствами помех перекрывающимися полосами часто рекомендуется применять низкую мощность излучения, что устанавливается Европейским стандартом ETSI EN 302 065-1 [18]. Например, в предпочтительном диапазоне рабочей полосы пропускания 3,1 – 4,8 ГГц и 6 – 9 ГГц максимальная средняя спектральная плотность мощности не должна превышать -41,3 дБм/МГц. Стационарное размещение СШП-передатчика на открытом пространстве для использования в рое дронов и других видах авиации, необходимо также использовать другие более строгие отраслевые правила.

Далее рассмотрим беспроводные ячеистые сети для беспилотных летательных аппаратов, которые можно применять для эффективной маршрутизации данных. Такая топология с динамически связанными напрямую структурными узлами без соблюдения иерархии имеет сильную взаимосвязанность узлов, позволяющую диверсифицировать маршрут пересылки пакетов, а сообщения передаются через промежуточные узлы от любого источника к определенному месту назначения за несколько переходов (многоступенчатая передача).

Преимущества ячеистых сетей: быстрая установка, низкие затраты на обслуживание, повышенная надежность доставки данных децентрализованной сетевой архитектуры. Недостатки: сбои в соединении из-за помех, мобильности, не соответствие требованиям по скорости передачи данных.

Для выполнения операций динамической самоорганизации и самоконфигурации в сетях с ячеистой топологией выполняются процедуры обнаружения и пиринга, позволяющие находить другие узлы и управлять их подключением в ячеистой сети. Обнаружение функционирующей беспроводной ячеистой сетью присоединяемого узла осуществляется одним из двух режимов механизма Mesh Peering Management (MPM) [19] пассивный режим (поиск радиомаяков во всем спектре радиоканалов) и активный режим (запросы на использование радиомаяков отправляются и принимаются). Соседние узлы связаны прямой связью только в том случае, если они являются одноранговыми сетевыми узлами. После обнаружения сети два ее соседних узла могут создать одноранговую сеть друг с другом.

Для облегчения создания и закрытия сетевого пиринга используется протокол MPM – поправка к стандарту IEEE 802.11 [20], устанавливающая, что сообщения запроса используются функцией объекта управления станцией (Station Management Entity, SME), а взаимодействие mesh-узлов осуществляется посредством функций объекта управления подуровня MAC (MAC Sublayer Management Entity, MLME). В сообщении подтверждения MPM сообщается о результатах запроса, а сообщение с указанием MPM используется MLME для передачи данных о любых состояниях взаимодействия с другими узлами в SME. Наконец, ответные сообщения MPM используются для отправки ответов на MLME, указанные MAC-адресами одноранговых узлов.

Сети с ячеистой топологией ретранслируют сообщения, используя либо метод флудинга, либо механизм маршрутизации. Сообщения пересылаются по пути от отправителя к узлу-получателю. Узлы принимают решения о пересылке на основе информации о пути в сети. Основная информация о переадресации состоит из MAC-адреса узла сети назначения, адреса следующего перехода, списка предшественников и срока службы информации о переадресации. Протокол выбора пути передачи данных mesh может быть полезен благодаря сочетанию элементов реагирования и проактивности, которые обеспечивают эффективный выбор пути в широком спектре ячеистых сетей. Несмотря на то, что стандарт mesh-сетей IEEE 802.11s не зависит от какого-либо конкретного протокола маршрутизации, в стандарте в качестве предпочтительного протокола маршрутизации продвигается гибридный протокол беспроводной маршрутизации (Hybrid Wireless Mesh Protocol, HWMP) [21].

Указанный протокол HWMP, сочетая гибкость процесса выбора пути по требованию с проактивным расширением дерева топологии, активная часть которого основана на специальном протоколе маршрутизации сети по требованию (Ad Hoc On-Demand Distance Vector, AODV) [22], который на основе метрики соединения и MAC-адреса осуществляет маршрутизацию, переключаясь в один из двух режимов:

- 1) "по требованию" – взаимодействие mesh-узлов с использованием сети равноправных узлов, имеющих одинаковые права доступа к сетевым ресурсам;
- 2) упреждающего построения дерева, расширяющий режим "по требованию" и обеспечивающий функциональность построения дерева.

Для передачи пакета данных mesh-сеть требуется соединение узлов, которое осуществляется с помощью протокола AODV, который при поиске маршрутов в сети прибегает к следующим сообщениям-пакетам, реализованным как простые UDP-пакеты (маршрутизация по-прежнему основана на протоколе Интернета IP):

- запрос маршрута (Route request, RREQ) – широковещательное сообщение от узла-источника, передаваемое по всей сети (сообщение имеет time-to-live («время жизни»), ограничивающее количество переходов между узлами);

- ответ маршрута (Route reply, RREP) – сообщение, отправляемое по временному пути к запрашивающему узлу при получении узлом в сети запроса, он может (как правило, каждый узел сравнивает различные пути по их длине и выбирает наиболее удобный);

- ошибка маршрута (Route error, RERR) – сообщение, генерирующееся для оповещения остальной части сети о том, что узел больше не доступен;

- корневое извещение (Root announcement, RANN) – сообщения для распространения метрик пути к корневому mesh-узлу и не содержащее информации о пути.

Если исходному mesh-узлу необходимо найти путь к целевому узлу, он передает предварительный запрос с указанием целевого пути, указанного в списке целей. Получая новый предварительный запрос, mesh-узел создает или обновляет информацию о своем пути к исходному узлу сетки и распространяет предварительный запрос на соседние одноранговые узлы сетки. После создания или обновления пути к исходному mesh-узлу целевой узел сетки отправляет подготовительное сообщение с индивидуальным адресом обратно исходному mesh-узлу. Если mesh-узел, получивший PREQ, является целевым узлом, он отправляет PREP с индивидуальным адресом обратно на mesh-узел-отправителя после создания или обновления пути к отправителю. В проактивном режиме корневой mesh-узел периодически распространяет сообщения RANN в сети. При получении RANN каждый mesh-узел, создавший или обновивший путь к корневому mesh-узлу, отправляет индивидуально адресованный запрос PREQ корневому узлу через mesh-узел сетки, от которого он получил RANN.

Выводы. В статье представлен анализ приложений и обзор коммуникационных решений для проектирования роя дронов в аспекте существующих беспроводных технологий и управления ячеистой сетью для роботизированной связи, определенных в соответствии со стеком протоколов (рис. 4). Основными стандартами, широко используемыми в современных потребительских и промышленных системах дистанционного управления беспилотными летательными аппаратами, являются IEEE 802.11 и IEEE 802.15.4. Серия IEEE 802.11 обладает преимуществами в отношении пропускной способности по сравнению с IEEE 802.15.4. Поправка к стандарту IEEE 802.11s расширяет возможности Wi-Fi с помощью ячеистых сетей, обеспечивая привлекательную альтернативу маломощным сетям радиосвязи.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Булатицкий, Д. И. Подсистема визуализации программного комплекса для поиска людей и транспортных средств с помощью беспилотного летательного аппарата / Д. И. Булатицкий, А. А. Селифонов // Труды Международной конференции по компьютерной графике и зрению "Графикон". – 2022. – № 32. – С. 1102-1114. – DOI 10.20948/graphicon-2022-1102-1114.
2. Алгоритм поддержки принятия управленческих решений по применению БПЛА для поиска пострадавших при авиакатастрофах / И. О. Мамонтова, И. Л. Скрипник, Д. В. Савельев, Т. Т. Каверзнева // Сибирский пожарно-спасательный вестник. – 2024. – Т. 32, № 1. – С. 68-79. – DOI 10.34987/vestnik.sibpsa.2024.13.53.008.
3. Довгаль, В. А. Анализ систем коммуникационного взаимодействия дронов, выполняющих поисковую миссию в составе группы / В. А. Довгаль, Д. В. Довгаль // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. – 2020. – № 4(271). – С. 87-94.

4. Патент на полезную модель № 209690 U1 Российская Федерация, МПК В64С 39/02, H02J 50/00. устройство для увеличения продолжительности и дальности полета беспилотного летательного аппарата : № 2021129032 : заявл. 04.10.2021 : опубл. 18.03.2022 / Б. К. Сивяков, А. А. Скрипкин, Д. Б. Сивяков ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.". – EDN BPISNC.
5. ГОСТ Р 59520-2021. Беспилотные авиационные системы. Функциональные свойства станции внешнего пилота: национальный стандарт Российской Федерации: введен 2021-07-01. – М.: Стандартинформ, 2021 – 15 с.
6. Dovgal, V.A. Making decisions about the placement of unmanned aerial vehicles based on the implementation of an artificial immune system in relation to information processing / V. A. Dovgal // Proceedings – 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2021, Sochi, 17–21 мая 2021 года. – Sochi, 2021. – P. 828-833. – DOI 10.1109/ICIEAM51226.2021.9446353.
7. 3GPP, TR 22.803 V12.2.0 feasibility study for proximity services (ProSe) (Release 12), Technical Report, 2012 [Электронный ресурс]. – URL: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=653> (дата обращения 05.03.2025).
8. 3GPP, TR 23.703 V12.2.0 исследование по усовершенствованию архитектуры для поддержки услуг на основе близости (ProSe) (Release 12), технический отчет, 2013 [Электронный ресурс]. – URL: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=864> (дата обращения 05.03.2025).
9. 3GPP: Стандарты для IoT, 2020 [Электронный ресурс]. – URL: https://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1805-iot_r14 (дата обращения 05.03.2025).
10. A survey on 5G millimeter wave communications for UAV-assisted wireless networks / L. Zhang [et al.] // IEEE Access. –2019. – V. 7. – P. 117460–117504.
11. I. Qualcomm Technologies, LTE Unmanned aircraft systems, Technical Report, 2017 [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/lte-unmannedaircraft-systems-trial-report.pdf> (дата обращения 05.03.2025).
12. R. Wirén Ericsson, 5G AND uav Use CASES IEEE 5G-IOT SUMMIT HELSINKI, Technical Report, 2017 [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.5gsummit.org/helsinki/docs/RWiren-5GandUAVusecases-2017-09-18.pdf> (дата обращения 05.03.2025).
13. QoS Analysis of Video Streaming in the UAV Networks with WiFi Standards / K. E. Korepanov, I. A. Kaisina, R. E. Shibano [et al.] // Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova. – 2021. – Vol. 24, No. 4. – P. 73-79. – DOI 10.22213/2413-1172-2021-4-73-79. – EDN NWYRDU.
14. Zolanvari, M. Potential data link candidates for civilian unmanned aircraft systems: A survey / M. Zolanvari, R. Jain, T. Salman // IEEE Commun. Surv. Tutor. – 2020. – V. 22 (1). – P. 292–319. – URL: <http://dx.doi.org/10.1109/COMST.2019.2960366> (дата обращения 05.03.2025).
15. Тупиков, П. А. Исследование характеристик сверхширокополосного приемопередатчика стандарта IEEE802.15.4-2011 / П. А. Тупиков, А. И. Морозкина, С. С. Хлыбова // Системы управления и информационные технологии. – 2020. – № 3(81). – С. 60-63.
16. Experimental study of UWB connectivity in industrial environments, Technical Report, 2018 [Электронный ресурс]. – URL: <http://data.bettstetter.com/publications/schmidt-2018-ew-uwb.pdf> (дата обращения 05.03.2025).
17. UWB Channel Sounding and Modeling for UAV Air-to-Ground Propagation Channels / Khawaja, W. [et al.] // 2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). – 2016. – 7 p.
18. ETSI EN 302 065-1 V2.1.1 (2016-11), Technical Report, 2016 [Электронный ресурс]. – URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302000_302099/30206501/02.01.01_60/en_30206501v020101p.pdf (дата обращения 05.03.2025).
19. Experimental performance analysis of two-hop aerial 802.11 networks. IEEE / E. Yanmaz, S. Hayat, J. Scherer, C. Bettstetter // 2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). – 2014. – P. 3118-3123. – DOI 10.1109/WCNC.2014.6953010.
20. Astudillo, J. P. A Joint Multi-Path and Multi-Channel Protocol for Traffic Routing in Smart Grid Neighborhood Area Networks / J. P. Astudillo, L. J. C. Llopis // Sensors. – 2018. – V. 18. – P. 4052. – DOI 10.3390/s18114052.

21. ISO/IEC/IEEE 8802-11:2022(Main) Telecommunications and information exchange between systems – Specific requirements for local and metropolitan area networks – Part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications [Электронный ресурс]. – URL: https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/ca6bd113-7bb9-4e6f-bb84-93b14073f1c5/iso-iec-ieee-8802-11-2022?srsId=AfmBOooSPjcfpdd1FP91N1EjzpK0_k4urM9G23bdkHHe2p728VK4nGkA (дата обращения 05.03.2025).
22. Impact of Ad-hoc on-demand distance vector on TCP traffic simulation using network simulator / A. Kumar, R. Shree, A. Kant Shukla [et al.] // Materials Today: Proceedings. – 2022. – V. 51. – P. 95-103. – DOI 10.1016/j.matpr.2021.04.578.

Поступила в редакцию 12.03.2025 г., рекомендована к печати 28.03.2025 г.

ANALYZING COMMUNICATION PROTOCOLS FOR AUTONOMOUS UNMANNED AERIAL VEHICLES PERFORMING COOPERATIVE FLIGHT

Kuizheva S.K., Dovgal V.A.

The descriptions of the elements of computer technology devices for the creation of specialized automated systems for scientific research of radio control based on the echo effect are given. The mechanism of phonon echo formation is given. The communication system is a crucial part of the design system of an autonomous unmanned aerial vehicle (UAV). It has to consider various factors including efficiency, reliability and mobility of the UAV. The paper analyzes the protocols that support the wireless communication technology of a group of drones and discusses mesh networks. The aim of the paper is to review the complete stack of communication protocols for UAVs used for data exchange during flight execution.

Keywords: networked control system, networked control system model, wireless technologies, autonomous system, unmanned aerial vehicle, drone swarm, wireless communication mesh network.

Куижева Саида Казбековна

доктор экономических наук, доцент, ректор
ФГБОУ ВО «Майкопский государственный
технологический университет»,
Российская Федерация, Республика Адыгея,
г. Майкоп.

Kuizheva Saida Kazbekovna

Doctor of Economics Sciences, Associate Professor,
Rector of Maykop State Technological University,
Russian Federation, Republic of Adygea, Maykop.

Довгаль Виталий Анатольевич

кандидат технических наук, доцент кафедры
информационной безопасности и прикладной
информатики, ФГБОУ ВО «Майкопский
государственный технологический университет»,
Российская Федерация, Республика Адыгея,
г. Майкоп.
E-mail: urmia@mail.ru

Dovgal Vitalii Anatolevich

Candidate of Technical Sciences, Associate
Professor at Department of Information Security and
Applied Informatics of Maykop State Technological
University,
Russian Federation, Republic of Adygea, Maykop.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ СОСТОЯНИЙ СИСТЕМЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВУЗА В УСЛОВИЯХ АВТОМАТИЗАЦИИ

© 2025 Грачев М.И.

В работе представлена математическая модель динамики состояний системы по автоматизации технологических процессов управления вузом, описывающая взаимодействие между частотой возникновения проблем, их идентификацией и нейтрализацией. Показателем эффективности реализации решения является вероятность успешного решения проблем возникающих в технологических процессах вуза. Модель позволяет решать прямую и обратную задачи, определяя характеристики системы, необходимые для достижения заданного уровня показателя эффективности реализации решения, что достигается за счет внедрения программно-аппаратных комплексов и переподготовки кадров. Это обеспечивает принятие обоснованных управленческих решений и повышение эффективности достижения целевых показателей вуза.

Ключевые слова: автоматизация, технологические процессы, управление, модель решения, показатель эффективности реализации решения.

Введение. В образовательных организациях технологические процессы управления направлены на создание эффективной и доступной образовательной среды, которая будет соответствовать современному развитию информационных технологий, и способствовать повышению качества обучения.

Для достижения поставленных целей требуется автоматизация технологических процессов управления образовательной организации, но в настоящее время автоматизация технологических процессов управления происходит на основе решения прямой задачи, что не всегда гарантирует достижение цели деятельности.

В публикуемой в настоящее время литературе рассматриваются различные способы и методы по автоматизации технологических процессов, например в работе авторов, Бабошина В.А. и Костюка А.В. исследуется возможность по автоматизации информационно-методического обеспечения образовательного процесса [1].

В статье Савельевой С.В. рассматривается структура информационного пространства профессионального учебного заведения, а автоматизация предлагается на основе внедрения программного комплекса позволяющего повысить качество и эффективность работы сотрудников образовательного учреждения [2].

В статье авторов Ананьева П.И. и Кайгородова М.А. предлагается метод автоматизации бизнес-процессов, позволяющий оперативно реагировать и актуализировать единую автоматизированную информационную систему управления высшего учебного заведения (вуза) в связи с изменениями требований законодательства РФ в сфере образования [3].

В диссертационном исследовании Бодруг Н.С. затрагиваются вопросы процессов подготовки инженеров в области автоматизации технологических процессов и производств, разрабатывается структурно-функциональная модель педагогического проектирования подготовки специалистов [4].

В диссертационном исследовании Ткаченко А.Л. решается задача «по повышению эффективности образовательного процесса вуза путем поддержки принятия решений при выборе получателей в системе документооборота и при выборе предприятий для организации практик» обучаемых [5].

В диссертационном исследовании Леонова А.Г. спроектирован исследовательский инструментарий позволяющий автоматизировано обследовать уровень достижений обучающихся [6].

Рассмотренные публикации решают прямую задачу по автоматизации технологических процессов управления вузом, что не в полной мере для практики позволяет гарантировать достижение цели деятельности. В связи с данным фактом в данной работе решается обратная задача позволяющая получать требуемые характеристики необходимые для автоматизации технологических процессов управления вуза при задаваемом уровне показателя эффективности реализации решения. Согласно, государственного оборонного заказа к вузам предъявляются требования по выпуску необходимого количества специалистов. Для соблюдения предъявляемых требований необходимо совершенствовать технологические процессы управления вуза, через их автоматизацию, что позволит сохранять обучающихся в вузе и выпускать требуемое количество специалистов.

Для руководителя образовательной организации необходимо, чтобы возникающие трудности в технологических процессах управления вуза своевременно идентифицировались и нейтрализовались. Для такой постановки вопроса необходимо иметь модель решения, позволяющую своевременно реагировать на данные затруднения. Такая модель в публикуемой литературе не представлена, что определяет актуальность данной работы.

Как известно, всё, что создано руками человека, создано на основе его деятельности, а деятельность ведётся на основе принимаемых им решений, за счет сформированной в процессе жизни модели решения [7-12].

Механизм формирования модели решения. «В связи с данным фактом применяем метод синтеза для получения модели решения. Применяем метод декомпозиции, позволяющий разложить решение на обстановку, информационно-аналитическую работу и само решение (реализацию предназначения объекта управления)» [13].

«Применяя метод абстрагирования связываем обстановку со средним временем образования проблем в технологических процессах управления вуза $\Delta t_{пп}$, информационно-аналитическую работу со средним временем идентификации проблемы $\Delta t_{ип}$, а само решение со средним временем нейтрализации проблемы $\Delta t_{нп}$ » [13].

Применяя метод декомпозиции, преобразуем всё в модель решения $P = f(t_{nn}, t_{un}, t_{nn})$.

Рассматриваемую систему по автоматизации технологических процессов управления вузом можно представить в виде графа состояний системы.

Визуальное представление динамики системы функционирования вуза представлено в виде графа состояний, где узлы соответствуют состояниям (S1, S2, S3, S4), а ребра – переходам между состояниями, обозначенным соответствующими частотами (λ , v_1 , v_2 , ξ^+ , ξ^-), рисунок 1. На рисунке 1:

λ – частота возникновения проблем в системе управления вуза ($\lambda = 1/\Delta t_{пп}$),

v_1 – частота идентификации проблем в системе управления ($v_1 = 1/\Delta t_{ип}$),

v_2 – частота нейтрализации проблем в системе управления ($v_2 = 1/\Delta t_{нп}$),

ξ^+ – частота выполнения целевой задачи,

ξ^- – частота срыва выполнения целевой задачи.

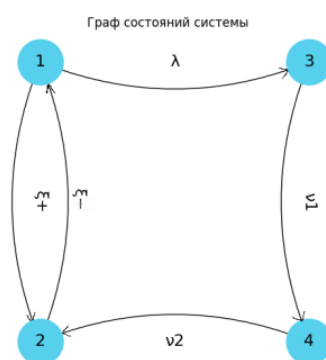


Рис. 1. Граф состояний системы

Описание состояний системы: Предлагаемая модель базируется на анализе четырех ключевых состояний системы функционирования вуза ($S_i, i = 1 \dots 4$):

- $S_1(1)$ (Штатное состояние). Состояние, характеризующее нормальное функционирование вуза, при котором отсутствуют явные проблемы в технологических процессах управления;

- $S_2(2)$ (Требуемое состояние). Состояние, к которому стремится система, характеризующееся успешной нейтрализацией проблемы, возникшей в технологических процессах вуза, с использованием имеющихся ресурсов;

- $S_3(3)$ (Состояние проявления проблемы): Состояние, в котором проблема проявляется в технологических процессах вуза, нарушая штатное функционирование. На данном этапе проблема еще не идентифицирована;

- $S_4(4)$ (Состояние идентификации проблемы). Состояние, в котором проблема, проявившаяся в технологических процессах вуза идентифицирована и нейтрализована.

Описание переходов между состояниями. Динамика системы функционирования вуза описывается переходами между указанными состояниями, характеризующимися следующими частотами:

- λ (Частота возникновения проблем). Характеризует интенсивность возникновения проблем в системе управления вуза. Определяется как величина, обратная среднему времени между проявлениями проблем ($\lambda = 1/\Delta t_{пп}$), где $\Delta t_{пп}$ – среднее время между проявлениями проблем. Переход $1 \rightarrow 3$;

- ν_1 (Частота идентификации проблем). Характеризует эффективность системы мониторинга и скорость выявления проявившихся проблем. Определяется как величина, обратная среднему времени, необходимому для идентификации проблемы ($\nu_1 = 1/\Delta t_{ип}$), где $\Delta t_{ип}$ – среднее время идентификации проблемы. Переход $3 \rightarrow 4$;

- ν_2 (Частота нейтрализации проблем). Характеризует скорость и успешность нейтрализации идентифицированных проблем с использованием имеющихся ресурсов вуза. Определяется как величина, обратная среднему времени, необходимому для нейтрализации проблемы ($\nu_2 = 1/\Delta t_{нп}$), где $\Delta t_{нп}$ – среднее время нейтрализации проблемы. Переход $4 \rightarrow 2$;

- ξ_+ (Частота выполнения целевой задачи). Характеризует вероятность успешного достижения целей, стоящих перед вузом, при условии штатного функционирования системы. Переход $1 \rightarrow 2$;

- ξ_- (Частота срыва выполнения целевой задачи). Характеризует вероятность срыва выполнения целевой задачи, связанного с возникновением и проявлением проблем в системе управления вуза. Переход $2 \rightarrow 1$.

Рассматриваемая система, динамическое поведение которой представлено графом состояний, состоящим из четырех дискретных состояний, подлежит математическому моделированию с использованием дифференциальных уравнений Колмогорова. Данный подход позволяет аналитически описать состояния нахождения системы в каждом из состояний в произвольный момент времени:

$$\begin{cases} \frac{dP_1(t)}{dt} = -(\xi^+ + \lambda) \cdot P_1(t) + \xi^- \cdot P_2(t), \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \xi^+ \cdot P_1(t) - \xi^- \cdot P_2(t) + \nu_2 \cdot P_4(t), \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda \cdot P_1(t) - \nu_1 \cdot P_3(t), \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = \nu_1 \cdot P_3(t) - \nu_2 \cdot P_4(t). \end{cases}$$

Полученная система дифференциальных уравнений Колмогорова, совместно с условием нормировки и заданными начальными условиями, представляет собой математическую модель, описывающую состояния вероятностей состояний во времени.

Применяя метод Гаусса, преобразуем рассматриваемую систему в линейные алгебраические уравнения:

$$P_1 = \frac{\xi^- \cdot \nu_1 \cdot \nu_2}{\lambda \cdot \xi^- \cdot \nu_1 + \lambda \cdot \xi^- \cdot \nu_2 + \lambda \cdot \nu_1 \cdot \nu_2 + \xi^+ \cdot \nu_1 \cdot \nu_2 + \xi^- \cdot \nu_1 \cdot \nu_2}.$$

$$P_2 = \frac{\lambda \cdot \nu_1 \cdot \nu_2 + \xi^+ \cdot \nu_1 \cdot \nu_2}{\lambda \cdot \xi^- \cdot \nu_1 + \lambda \cdot \xi^- \cdot \nu_2 + \lambda \cdot \nu_1 \cdot \nu_2 + \xi^+ \cdot \nu_1 \cdot \nu_2 + \xi^- \cdot \nu_1 \cdot \nu_2}.$$

$$P_3 = \frac{\lambda \cdot \xi^- \cdot \nu_2}{\lambda \cdot \xi^- \cdot \nu_1 + \lambda \cdot \xi^- \cdot \nu_2 + \lambda \cdot \nu_1 \cdot \nu_2 + \xi^+ \cdot \nu_1 \cdot \nu_2 + \xi^- \cdot \nu_1 \cdot \nu_2}.$$

$$P_4 = \frac{\lambda \cdot \xi^- \cdot \nu_1}{\lambda \cdot \xi^- \cdot \nu_1 + \lambda \cdot \xi^- \cdot \nu_2 + \lambda \cdot \nu_1 \cdot \nu_2 + \xi^+ \cdot \nu_1 \cdot \nu_2 + \xi^- \cdot \nu_1 \cdot \nu_2}.$$

Для нас важным является состояние P_2 состояние системы, при котором происходит идентификация и нейтрализация возникающих проблем в технологических процессах управления:

$$P_2 = \frac{\xi^+ \nu_1 \nu_2 + \lambda \nu_1 \nu_2}{\nu_1 \nu_2 \xi^- + \xi^+ \nu_1 \nu_2 + \lambda \nu_1 \nu_2 + \lambda \nu_2 \xi^- + \lambda \nu_1 \xi^-}.$$

Предлагаемая модель может быть использована для анализа эффективности различных управленческих стратегий и выявления слабых мест в системе управления вуза. Дальнейшие исследования могут быть направлены на определение стационарных вероятностей нахождения системы в каждом из состояний. Анализ влияния частот переходов (λ , ν_1 , ν_2 , ξ^+ , ξ^-) на стационарные вероятности. Оптимизацию параметров системы управления вуза с целью минимизации вероятности нахождения в нежелательных состояниях (S3 и S4) и максимизации вероятности нахождения в состояниях эффективной работы (S1 и S2).

Визуализация данных может быть представлена 2D графиками, рисунок 2.

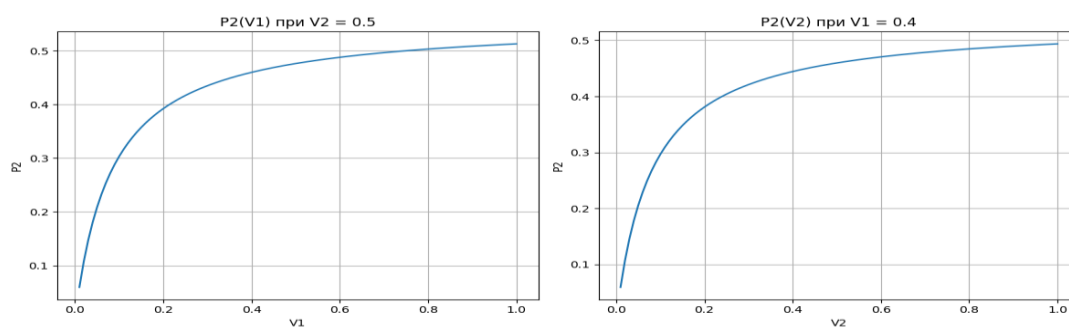


Рис. 2. Графики зависимости вероятности (P_2) от частоты идентификации проблем (v_1) и от частоты нейтрализации проблем (v_1)

Эти графики отображают, как изменяется вероятность нахождения системы в состоянии, когда проблема успешно нейтрализована (S_2), в зависимости от частоты идентификации проблем (v_1), при условии, что частота нейтрализации (v_2), частота возникновения проблем (λ) и частоты выполнения и срыва задач (ξ^+ , ξ^-) поддерживаются на постоянном уровне, график слева. Или в зависимости от частоты нейтрализации проблем (v_2), при условии, что частота идентификации проблем (v_1), частота возникновения проблем (λ) и частоты выполнения и срыва задач (ξ^+ , ξ^-) поддерживаются на постоянном уровне, график справа.

Эти графики помогают определить приоритеты для улучшения процесса идентификации и нейтрализации проблем. Если кривые $P_2(v_1)$, $P_2(v_2)$ имеют высокую крутизну, то инвестиции в улучшение идентификации и нейтрализации (например, внедрение автоматизированных систем, обучение персонала, внедрение ресурсов) будут оправданы.

Зависимость P_2 от v_1 и v_2 может быть представлена 3D графиком, рисунок 3.

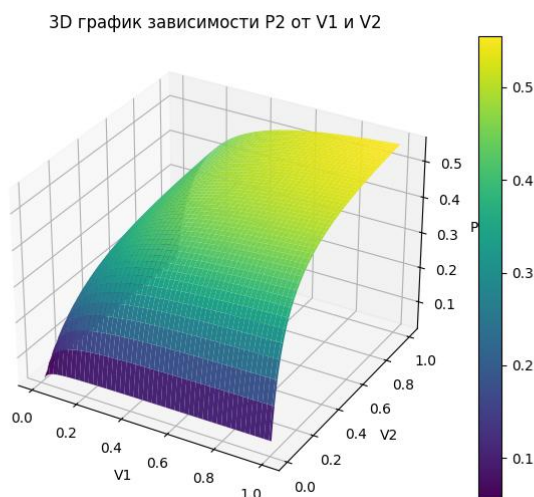


Рис. 3. 3D график зависимости вероятности (P_2) от частоты идентификации проблем (v_1) и от частоты нейтрализации проблем (v_1)

3D график, полученный в результате математического моделирования, представляет собой визуализацию зависимости эффективности автоматизации (P_2) от двух ключевых факторов: частоты идентификации проблем (v_1) и частоты нейтрализации проблем (v_2) в человеко-машинных системах управления [14].

График представляет собой трехмерную поверхность, где:

- ось $X (v_1)$: Представляет частоту идентификации проблем в автоматизированных технологических процессах управления. Более высокие значения v_1 соответствуют более эффективной системе мониторинга и сигнализируют об отклонениях;

- ось $Y (v_2)$: Представляет частоту нейтрализации проблем в автоматизированных технологических процессах управления. Высокие значения v_2 указывают на наличие программно-аппаратного комплекса позволяющего своевременно нейтрализовать возникающие проблемы в технологических процессах управления, а также высокой подготовке персонала;

- ось $Z (P_2)$: Отображает показатель эффективности реализации решения. P_2 отражает вероятность достижения желаемого результата при использовании автоматизированного процесса. Значения P_2 варьируются от 0 до 1, где более высокие значения свидетельствуют о более эффективной автоматизации технологических процессов управления вузом.

Общие характеристики поверхности:

- положительная корреляция: В целом, поверхность графика демонстрирует положительную корреляцию между v_1 , v_2 и P_2 . Это означает, что при увеличении частоты идентификации и/или частоты нейтрализации проблем, эффективность автоматизации (P_2) также возрастает;

- нелинейность: Зависимость P_2 от v_1 и v_2 не является линейной. Форма поверхности может включать участки с более крутым подъемом и участки, где P_2 изменяется незначительно при изменении v_1 и v_2 ;

- наличие “плато”: При достаточно высоких значениях v_1 и v_2 , поверхность может достигать “плато”, где дальнейшее увеличение частоты идентификации или нейтрализации проблем не приводит к существенному росту эффективности автоматизации (P_2). Это указывает на то, что существуют другие факторы, ограничивающие общую эффективность системы.

Ключевые области для анализа:

- область низких значений v_1 и v_2 : В этой области P_2 , как правило, имеет низкие значения. Это свидетельствует о том, что неэффективная идентификация и нейтрализация проблем приводят к низкой эффективности автоматизации;

- область высоких значений v_1 и v_2 : В этой области P_2 , как правило, достигает максимальных значений (или выходит на “плато”). Это указывает на то, что эффективная идентификация и нейтрализация проблем позволяют достичь высокой эффективности автоматизации технологических процессов управления;

- области с крутым подъемом: Участки поверхности, где P_2 быстро возрастает при увеличении v_1 или v_2 , указывают на наиболее эффективные направления для улучшения системы. Например, если P_2 быстро растет при увеличении v_1 , но медленно при увеличении v_2 , то приоритетом является повышение эффективности идентификации проблем;

- область асимметрии: В некоторых случаях, поверхность может быть асимметричной относительно осей v_1 и v_2 . Это означает, что один из факторов (идентификация или нейтрализация) оказывает большее влияние на эффективность автоматизации.

Практическое применение и интерпретация. Анализ формы 3D графика позволяет определить оптимальные значения v_1 и v_2 . Выявить комбинацию частоты идентификации и частоты нейтрализации проблем, при которой достигается максимальная эффективность автоматизации (P_2) при заданных ограничениях на ресурсы.

Визуализация представления зависимости позволяет определить, в какие области следует внедрять имеющиеся ресурсы для достижения наибольшего эффекта. Определить, какие факторы ограничивают эффективность автоматизации. Например, если при высокой частоте идентификации проблем, эффективность автоматизации остается низкой, то это указывает на необходимость улучшения процесса нейтрализации проблем. Применение имеющихся резервов в улучшение идентификации и нейтрализации проблем приводят к повышению эффективности автоматизации и достижению желаемых результатов.

Предложенная математическая модель и полученный показатель эффективности реализации решения (P_2) предоставляют мощный инструмент для управления вузом и достижения целевых показателей, задаваемых руководителем. Модель позволяет решать как прямую, так и обратную задачу, чем определяется её научная новизна.

Прямая задача. При известных характеристиках системы (частотах возникновения, идентификации и нейтрализации проблем, а также частотах выполнения и срыва задач) модель позволяет оценить показатель эффективности реализации решения (P_2). Это дает возможность прогнозировать результаты внедрения тех или иных изменений в технологических процессах управления вузом.

Обратная задача. Руководство вуза определяет требуемый уровень эффективности (P_2), соответствующий достижению требуемого уровня автоматизации технологических процессов управления вуза. Модель позволяет определить необходимые значения характеристик системы (v_1 , v_2), при неизменных (λ , ξ^+ , ξ^-), которые необходимо достичь для достижения заданного P_2 .

Достижение требуемого уровня P_2 осуществляется за счет внедрения программно-аппаратных комплексов и переподготовки кадрового состава.

Руководство вуза, используя модель, может определить, какие конкретные действия необходимо предпринять для достижения заданного уровня P_2 . Эти действия могут включать:

- внедрение программно-аппаратных комплексов, которыми располагает руководитель улучшающие идентификацию проблем за счет внедрения современных систем мониторинга, автоматизированных систем диагностики и анализа данных, позволяет оперативно выявлять возникающие проблемы в технологических процессах управления;

- ускорение нейтрализации проблем, за счет внедрения автоматизированных систем поддержки принятия решений, экспертных систем и систем автоматизации учебного процесса, позволяет оперативно разрабатывать и реализовывать решения для нейтрализации выявленных проблем.

Переподготовка кадрового состава вуза осуществляется на основе повышения квалификации персонала в области ИТ и автоматизации за счет обучения персонала работе с новыми программно-аппаратными комплексами, а также методам анализа данных и принятия решений, что позволяет повысить эффективность использования внедренных технологий и, как следствие, улучшить показатели v_1 и v_2 .

Развитие компетенций в области управления рисками за счет обучения персонала работы на новых программно-аппаратных комплексах, методам прогнозирования по оценке рисками позволяет снизить частоту возникновения проблем и повысить устойчивость системы управления вузом.

Влияние на целевые показатели вуза. Повышение показателя эффективности реализации решения (P_2) оказывает положительное влияние на достижение ключевых целевых показателей вуза.

Повышение качества образования за счет своевременного выявления и нейтрализации возникающих проблем в технологических процессах управления способствует достижению высоких результатов в образовательной, научной деятельности, что способствует сохранению обучаемых в вузе.

Выводы. В целях повышения эффективности управления вузом и оперативного реагирования на возникающие проблемы разработана математическая модель, которая анализирует и описывает динамику состояний системы функционирования вуза. Модель позволяет оценить вероятность нахождения системы в различных состояниях.

3D график зависимости P_2 от v_1 и v_2 является мощным инструментом для анализа по моделированию человеко-машинных систем управления. Он позволяет получить ценную информацию о взаимосвязи между ключевыми факторами и принимать обоснованные решения для повышения эффективности автоматизации технологических процессов управления.

Представленная математическая модель является важным инструментом для автоматизации технологических процессов управления вуза, позволяющим принимать обоснованные управленческие решения на основе данных получаемых от модели.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Бабошин, В. А. Особенности автоматизации процессов управления образовательной деятельностью / В. А. Бабошин, А. В. Костюк // I-methods. – 2018. – Т. 10, № 4. – С. 24-31. – EDN YYNZSH.
2. Савельева, С. В. К вопросу об автоматизации управления профессиональным образовательным учреждением / С. В. Савельева // Инновационное развитие профессионального образования. – 2012. – № 1(01). – С. 134-138. – EDN TCUIGT.
3. Ананьев, П. И. Развитие единого информационного пространства как стратегическое направление в управлении образовательной организацией / П. И. Ананьев, М. А. Кайгородова // Южно-Сибирский научный вестник. – 2020. – № 1(29). – С. 29-33. – EDN UJYHRJ.
4. Бодруг, Н. С. Подготовка инженеров в области автоматизации технологических процессов и производств в системе дополнительного профессионального образования в цифровой образовательной среде вуза: специальность 13.00.08 "Теория и методика профессионального образования": диссертация на соискание ученой степени кандидата педагогических наук / Бодруг Наталья Сергеевна, 2022. – 260 с. – EDN IAPCYU.
5. Ткаченко, А. Л. Поддержка принятия решений в информационно-аналитической системе при организации образовательного процесса вуза: специальность 23.10.00: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ткаченко Анастасия Леонидовна, 2022. – 147 с. – EDN SOHTJT.
6. Леонов, А. Г. Интеграционная методология поэтапного формирования алгоритмического мышления при обучении информатике и программированию: автореферат дис. ... доктора педагогических наук: 5.8.2. / Леонов Александр Георгиевич; МГУ имени М.В. Ломоносова. – Москва, 2024. – 46 с.
7. Анохин, П. К. Системные механизмы высшей нервной деятельности: Избр. тр. / П. К. Анохин. – Москва: Наука, 1979. – 454 с.
8. Анохин, П. К. Идеи и факты в разработке теории функциональных систем / П. К. Анохин // Психологический журнал. – 1984. – Т. 5. – С. 107-118.
9. Моисеев, Н. Н. Математические задачи системного анализа / Н. Н. Моисеев; Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебного пособия для студентов вузов, обучающихся по специальности «Прикладная математика». – Москва: Федеральное государственное унитарное предприятие "Академический научно-издательский, производственно-полиграфический и книгораспространительский центр "Наука", 1981. – 488 с.
10. Моисеев, Н. Н. Численные методы теории оптимального управления / Н. Н. Моисеев. – М.: Наука, 1968. – 163 с.
11. Моисеев, Н. Н. Методы оптимизации. Гл. 2; 3. Нелинейное программирование; Динамическое программирование / Н. Н. Моисеев, А. Ф. Кононенко. – М.: Наука, 1972. – 156 с.
12. Моисеев, Н. Н. Человек и биосфера: Опыт систем, анализа и эксперименты с моделями / Н. Н. Моисеев, В. В. Александров, А. М. Тарко. – М.: Наука, 1985. – 271 с.

13. Грачев, М. И. Повышение эффективности работы организации на основе критерия автоматизации / М. И. Грачев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2023. – Т. 21, № 3. – С. 144-150. – DOI 10.22213/2410-9304-2023-3-144-150. – EDN MWLFLF.
14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025613561 Российская Федерация. Программа визуализации эффективности идентификации и нейтрализации потока проблем возникающего в технологических процессах управления на основе простой модели автоматизации: заявл. 13.01.2025; опубл. 12.02.2025 / М. И. Грачев, Н. Г. Грачева; заявитель Федеральное государственное казенное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский университет Министерства внутренних дел Российской Федерации». – EDN CVKDEC.

Поступила в редакцию 17.03.2025 г., рекомендована к печати 31.03.2025 г.

MATHEMATICAL MODEL OF THE DYNAMICS OF THE STATES OF THE UNIVERSITY FUNCTIONING SYSTEM IN THE CONDITIONS OF AUTOMATION

Grachev M.I.

The paper presents a mathematical model of the dynamics of the states of the system for automation of technological processes of university management, describing the interaction between the frequency of occurrence of problems, their identification and neutralization. The indicator of the effectiveness of the solution implementation is the probability of successful solution of problems arising in the technological processes of the university. The model allows solving direct and inverse problems, determining the characteristics of the system necessary to achieve a given level of the indicator of the effectiveness of the solution implementation, which is achieved through the implementation of software and hardware systems and retraining of personnel. This ensures the adoption of sound management decisions and increased efficiency in achieving the target indicators of the university.

Keywords: automation, technological processes, management, solution model, solution implementation efficiency indicator.

Грачев Михаил Иванович

научный сотрудник научно-исследовательского
отдела ФГКОУ ВО «Санкт-Петербургский
университет Министерства внутренних дел
Российской Федерации»,
Российская Федерация, г. Санкт-Петербург.
E-mail: mig2500@mail.ru

Grachev Mikhail Ivanovich

Researcher at the Research Department of the Saint
Petersburg University of the Ministry of Internal
Affairs of Russia,
Russian Federation, Saint-Petersburg

КОМПОНЕНТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАДИОКАНАЛОВ ПЭМИН

© 2025 Третьяков И.А., Куликова А.С., Долбещенкова Н.В., Ступак В.А.

В настоящей работе представлены рассмотрены основные компоненты – функциональные блоки разрабатываемой АСНИ радиоканалов, их функциональные особенности, а также взаимодействие между ними для обеспечения комплексного подхода к исследованию радиоканалов. Предложены функциональные блоки детектирования электромагнитных излучений и наводок, автоматизированного обнаружения каналов утечек информации, формирования широкополосного заградительного сигнала.

Ключевые слова: АСНИ, ПЭМИН, радиоканалы, детектирование, обнаружение, подавление.

Введение. Современные научные исследования в области радиоканалов побочных электромагнитных излучений и наводок (ПЭМИН) становятся все более актуальными в контексте развития технологий связи и управления [1-4]. С ростом числа беспроводных устройств и расширением спектра их применения возникает необходимость в создании эффективно функционирующих автоматизированных систем, способных обеспечить высокую степень надежности и точности в сборе, анализе и интерпретации данных.

Автоматизированные системы научных исследований (АСНИ) радиоканалов играют ключевую роль в мониторинге электромагнитного фона, выявлении источников помех и оценке их воздействия на работу радиоканалов [4-8]. Эффективность таких систем во многом зависит от правильно подобранных компонентов, каждый из которых выполняет свои специфические функции в рамках общего процесса.

В данной статье будут рассмотрены основные компоненты – функциональные блоки разрабатываемой АСНИ радиоканалов, их функциональные особенности, а также взаимодействие между ними для обеспечения комплексного подхода к исследованию радиоканалов. Особое внимание будет уделено актуальным методам и технологиям, направленным на повышение эффективности таких АСНИ, а именно: обнаружению утечки информации по радиоканалу, применению автоматизированного разведывательного приемника для обнаружения утечек информации посредством радиоканала, применению гармонических составляющих сигнала в системах противодействия утечкам информации посредством радиоканала.

Детектирование электромагнитных излучений и наводок. Сегодня имеется большое количество источников утечки информации, среди которых преобладают технические каналы. Основную массу этих каналов составляют те, которые получают данные через различные виды промодулированных электромагнитных сигналов. Одним из главных показателей наличия нелегального передатчика является незарегистрированное радиоизлучение. Поэтому устройства, предназначенные для выявления несанкционированной передачи информации за пределы контролируемой территории по радиоканалу, занимают важное место в системах обеспечения информационной безопасности.

Исследование проводилось в рамках научной з/б темы «Исследование природы каналов побочных электромагнитных излучений и наводок элементов и устройств офисной вычислительной техники» (регистрационный номер 124012400347-2).

К числу самых простых и популярных инструментов этой категории относятся детекторы электромагнитного излучения, которые являются необходимыми при проведении поисковых мероприятий. На профессиональном уровне борьба с незаконными методами извлечения информации осуществляется довольно успешно, но при этом требует значительных финансовых затрат, привлечения специалистов и применения широкого спектра технических средств. Поэтому поиск достаточно простых и относительно доступных решений для предотвращения утечки информации представляет собой актуальную задачу.

Анализ технической литературы по различным типам детекторов позволил выбрать соответствующую схему, с перспективой её дальнейшего усовершенствования [9-11]. В процессе модернизации был увеличен энергетический потенциал антенны, что позволило повысить чувствительность устройства и расширить дальность обнаружения. Установка фильтров на входе операционного усилителя улучшила помехозащищенность прибора, а добавление дополнительного операционного усилителя значительно увеличило чувствительность детектора. Разработанный детектор радиозакладок способен фиксировать излучения в диапазоне частот от 100 до 2000 МГц. На рисунке 1 представлена усовершенствованная принципиальная схема модернизированного детектора.

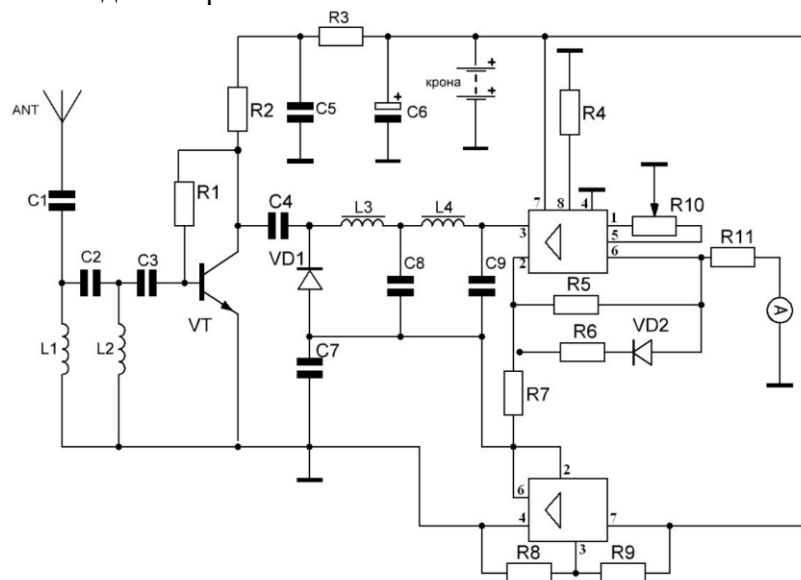


Рис. 1. Функциональный блок детектирования электромагнитных излучений и наводок

Схема данного детектора электромагнитных излучений и наводок представляет собой операционный усилитель с усилителем постоянного тока и каскадом высокочастотного усилителя, а также высокочастотным диодным детектором. На входе высокочастотного усилителя установлен фильтр, включающий в себя элементы L1, C2, L2 и C3, предназначенный для отсекаания сигналов с частотами ниже 10 МГц, чтобы избежать ложных срабатываний из-за фона от электропроводки и других потенциальных помех. Усилитель высокой частоты сконструирован по схеме с общим эмиттером, где с помощью резистора R1 устанавливается режим работы так, что на коллекторе транзистора VT1 поддерживается напряжение, равное половине напряжения питания. Затем сигнал через конденсатор C4 проходит на диодный детектор VD1, а выпрямленный сигнал поступает на вход операционного усилителя. Высокочастотные фильтры на L3, L4, C6 и C7 обеспечивают удаление высокочастотных составляющих сигнала перед его подачей на операционный усилитель.

Для оценки технических характеристик собранного детектора электромагнитных излучений и наводок были проведены эксперименты по обнаружению радиозакладных устройств и мобильных телефонов как в условиях прямой видимости, так и при наличии различных преград (деревянных и пластиковых). Результаты исследований показали, что данный детектор вполне способен надежно фиксировать радиопередающее устройство на расстоянии около 2 метров. Таким образом, усовершенствованная схема детектора электромагнитных излучений и наводок демонстрирует технические параметры, сопоставимые с профессиональными устройствами, при этом отличаясь доступной ценой и простой конструкцией.

Применение автоматизированного разведывательного приемника для обнаружения каналов утечек информации. Для выявления устройств, которые занимаются съёмом и передачей информации через радиоканалы, может быть использовать автоматизированный разведывательный приёмник [4]. Суть данного метода обнаружения заключается в сравнении спектра излучения на контролируемом объекте и спектра излучения за его пределами. Поскольку мощность скрытых устройств обычно бывает невысокой, спектрограмма, полученная даже в некотором отдалении от контролируемого периметра, будет отличаться от спектрограммы, измеренной внутри охраняемого пространства. Близость к закладному устройству приведёт к увеличению амплитуды на определённой частоте, в то время как уровень фонового излучения (от радиовышек, телевысостанций и т.д.) останется практически неизменным. Эффективность данного метода была проверена на макете автоматизированного приемника, структура которого изображена на схеме (рис. 2).

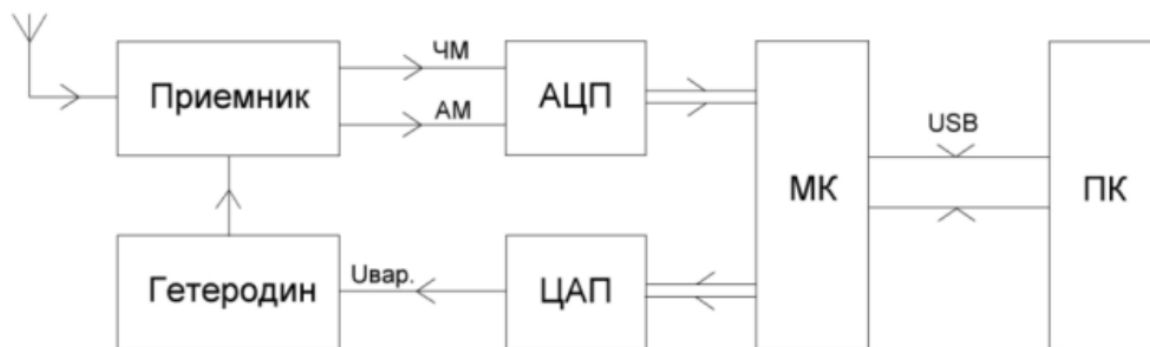


Рис. 2. Функциональный блок автоматизированного обнаружения каналов утечек информации

В качестве основы для приемника была выбрана интегральная микросхема TDA7021T. Высокая стабильность частоты гетеродина обеспечивается системой фазовой автоподстройки частоты. Управление частотой гетеродина осуществляется через варикап, который включён в цепь, задающую частоту. Микросхема имеет отдельные выходы для детектирования амплитудной и частотной модуляции. Сигналы с этих выходов поступают на аналого-цифровой преобразователь (АЦП), а данные с него передаются на микроконтроллер (МК), который также отвечает за запись данных в цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), с которого напряжение подаётся на варикап гетеродина. Таким образом, микроконтроллер не только получает информацию о наличии и характеристиках модуляции, но и способен перестраивать гетеродин приёмника. Кроме того, на микроконтроллер возложена функция взаимодействия с персональным компьютером (ПК). Интерфейс программы, управляющей автоматизированным разведывательным приемником с персонального компьютера показан на рис. 3.

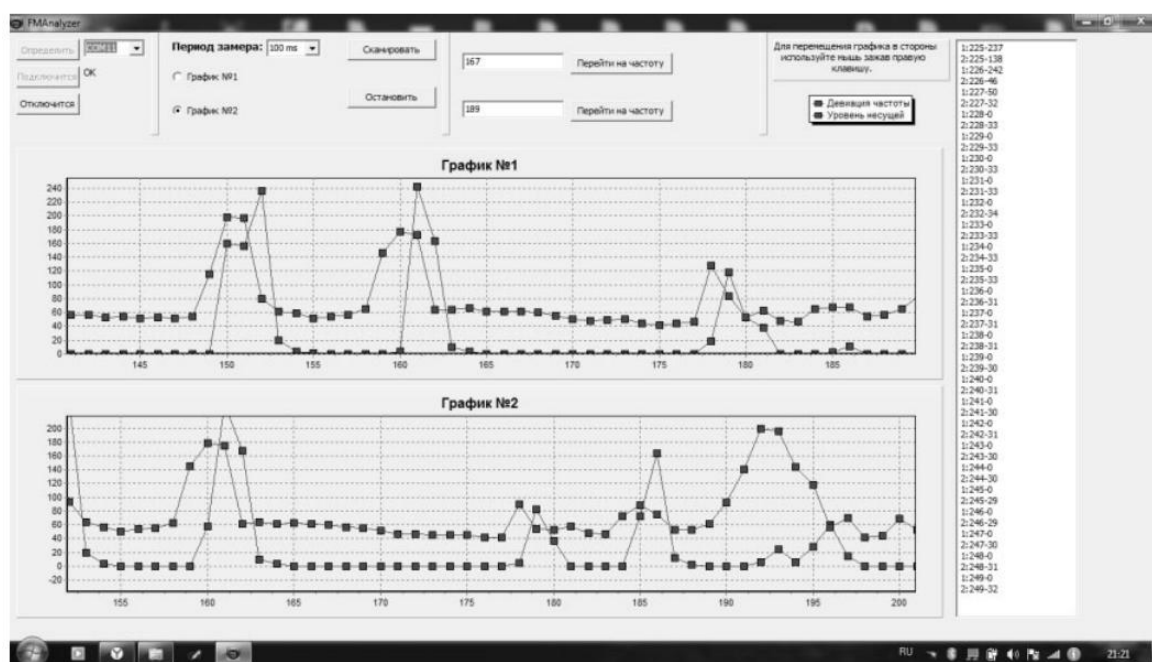


Рис. 3. Интерфейс программы управления автоматизированным разведывательным приемником

В интерфейсе программы есть возможность выбора графика, на который в данный момент ведется запись, а также определения периода измерений, ручного перехода к нужной частоте и активации режима автоматического сканирования. Например, на графике №2 (рис. 3) представлен узкополосный спектр с видимыми радиовещательными станциями, в то время как график №1 (рис. 3) показывает ту же частотную область с включенным передатчиком, имитирующим работу скрытого устройства. Обнаружение такого устройства осуществляется по появлению пиковой отметки на спектрограмме.

Применение гармонических составляющих сигнала в автоматизированных системах противодействия утечкам информации посредством радиоканала. Обобщенная упрощенная структурная схема функционального блока противодействия утечкам информации посредством радиоканала показана на рис. 4.

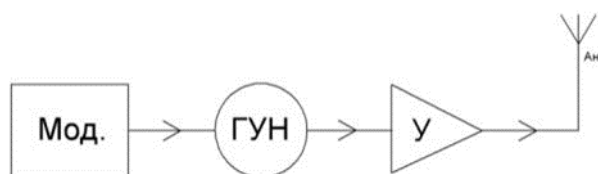


Рис. 4. Обобщенная структурная схема противодействия утечкам информации

Модулятор (МОД) управляет изменением частоты в зависимости от времени, используя генератор, который управляется напряжением (ГУН). В качестве генератора может быть использован синтезатор с фазовой автоподстройкой частоты [12]. Сигнал с ГУНа поступает на усилитель мощности (У), который увеличивает его до необходимых значений для передачи на антенну. Также между генератором и антенной может находиться фильтр, который позволяет выделить диапазон помех или устранить гармоники.

Из-за сложностей, связанных с получением значительного перекрытия по частотам одним каналом, применяется комбинация нескольких каналов с различными начальными и конечными частотами. Это усложняет конструкцию системы. Для формирования широкополосного заградительного сигнала предлагается использовать гармонические составляющие сигнала ГУНа. Упрощённая структурная схема такого функционального блока АСНИ радиоканалов, осуществляющего данную функцию, показана на рисунке 5.

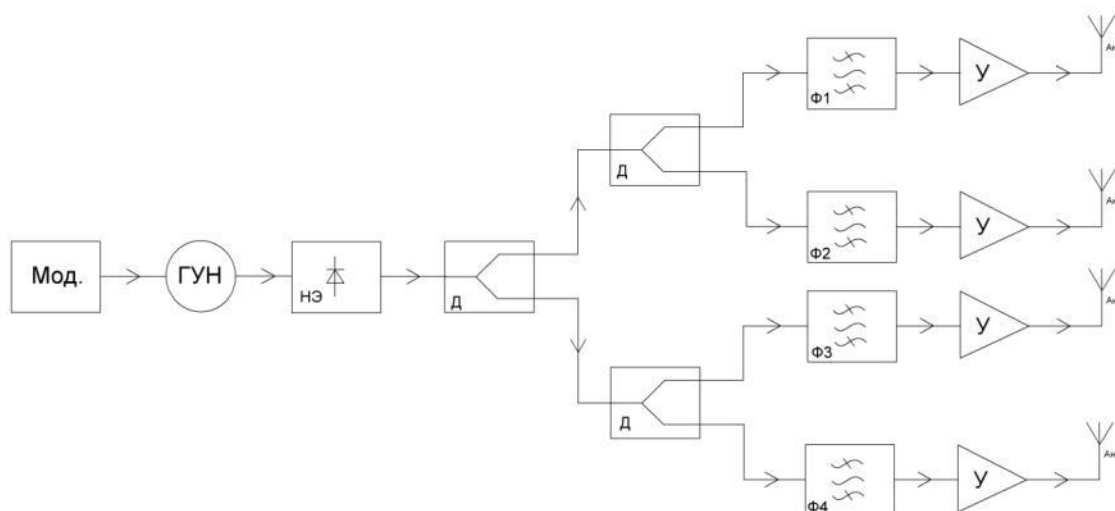


Рис. 5. Функциональный блок формирования широкополосного заградительного сигнала

Основное отличие предложенной структурной схемы (рис. 5) от обобщенной (рис. 4), заключается во включении нелинейного элемента (НЭ). В качестве такого элемента могут выступать диодный ограничитель, транзистор в классе С, интегральный умножитель частоты и подобные устройства. Главная задача этого элемента — снижение отношения фундаментальной частоты к гармоникам в сигнале генератора (ГУН). После этого сигнал разделяется на необходимое количество каналов с помощью делителей (Д). Полученный разветвлённый сигнал направляется на полосовые фильтры (Ф), которые выделяют нужные частотные диапазоны для последующего усиления и передачи на антенны.

В данном устройстве можно использовать явление «смыкания полос», когда гармоники перекрывают фундаментальную частоту, что возможно при использовании ГУН с перекрытием в октаву. Преимуществом этого способа формирования заградительного сигнала является возможность использования одного задающего генератора и одного ГУН для создания широкополосной помехи. Например, ГУН с диапазоном 50–100 МГц, работающий с первой по четвертую гармонику, охватывает диапазон от 50 до 800 МГц.

Однако у этого метода есть и недостатки, связанные с уменьшением потребляемой мощности на каждой частоте, так как полоса, перекрываемая каждой следующей гармоникой, в два раза больше полосы предыдущей. Для устранения этого недостатка предлагается увеличить мощность каналов, работающих на более высоких гармониках, пропорционально номеру гармоники.

Выводы. Таким образом, в работе рассмотрены основные компоненты — функциональные блоки разрабатываемой автоматизированной системы научных исследований радиоканалов. В качестве компонентов разрабатываемой АСНИ предложены:

- функциональный блок детектирования электромагнитных излучений и наводок, разработано и апробировано устройство для обнаружения несанкционированной передачи информации по радиоканалу, обладающее характеристиками, сопоставимыми с профессиональными устройствами, но отличающееся низкой стоимостью и простотой конструкции;

- функциональный блок автоматизированного обнаружения каналов утечек информации, управляемый с персонального компьютера;

- функциональный блок формирования широкополосного заградительного сигнала, использующий гармонические составляющие сигнала ГУНа.

Кроме того, рассмотренные функциональные блоки имеют перспективы использования автоматизированных системах обработки радиосигналов, в автоматизированных системах контроля радиообстановки (радиомониторинг, радиолокация, радиоидентификация, радиоразведка), информационно-измерительных системах и других смежных областях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Паршуткин, А. В. Повышение защищенности информации от утечки через побочные электромагнитные излучения / А. В. Паршуткин, М. Р. Неаскина // Вопросы кибербезопасности. – 2022. – № 3(49). – С. 82-89. – DOI 10.21681/2311-3456-2022-3-82-89. – EDN ARQCSJO.
2. Паршуткин, А. В. Экспериментальные исследования возможности применения программно-реализуемых мер снижения информативности побочных электромагнитных излучений видеосистемы стандарта DVI / А. В. Паршуткин, М. Р. Неаскина, И. П. Степанов // СПБНТОРЭС: труды ежегодной НТК. – 2023. – № 1(78). – С. 126-129. – EDN LAZWZX.
3. Булгаков, О. М. Демонстрация утечки информации посредством побочных электромагнитных излучений и ее перехвата при обучении специалистов в области информационной безопасности / О. М. Булгаков, Е. В. Петрова // Вестник Краснодарского университета МВД России. – 2024. – № 3(65). – С. 110-114. – EDN QNHXEC.
4. Рушечников, Я. И. Информационная технология радиомониторинга на основе программно-определяемой радиосистемы / Я. И. Рушечников, В. В. Данилов // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2020. – № 1. – С. 31-36. – EDN PXYUTX.
5. Ашихмин, А. В. Автоматизированная система радиомониторинга / А. В. Ашихмин, В. А. Козьмин, А. М. Рембовский // Спецтехника и связь. – 2012. – № 1. – С. 43-50. – EDN OXUPNJ.
6. Соловьев, А. М. О результатах разработки автоматизированной системы научных исследований средств мониторинга радиоэлектронной обстановки в АСУТП / А. М. Соловьев, А. А. Головин, Р. К. Кинденев // Технические науки - от теории к практике. – 2015. – № 53. – С. 80-88. – EDN VDWRPV.
7. Пометун, Е. Д. Разработка автоматизированной системы научных исследований для аэродинамического эксперимента / Е. Д. Пометун, Р. А. Хрипунов, А. В. Васильева // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2020. – № 1. – С. 4-8. – EDN BAUJKR.
8. Третьяков, И. А. Функциональные блоки для АСНИ радиосигналов / И. А. Третьяков, В. В. Данилов // Донецкие чтения 2024: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности: материалы IX Международной научной конференции (Донецк, 15–17 октября 2024 г.). – Т. 2. – Часть 2. – Донецк: Изд-во ДонГУ, 2024. – С. 88-91. – EDN ZEFZIV.
9. Новиков, А. В. Обнаружение радиозакладок с неизвестной модуляцией методом активного тестирования / А. В. Новиков // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2006. – Т. 2, № 1. – С. 105-109. – EDN JTXVSI.
10. Хорев, А. А. Использование индикаторов (детекторов) электромагнитного поля для выявления электронных устройств перехвата информации / А. А. Хорев // Специальная техника. – 2015. – № 4. – С. 49-63. – EDN UXWFGN.
11. Жинкина, А. С. Детектор радиозакладок / А. С. Жинкина, А. В. Безус // Донецкие чтения 2017: Русский мир как цивилизационная основа научно-образовательного и культурного развития Донбасса: Материалы Международной научной конференции студентов и молодых ученых (Донецк, 17–20 октября 2017 г.). – Т. 1. – Донецк: ДонНУ, 2017. – С. 199-200. – EDN YOUSAC.
12. Метод частотной модуляции в синтезаторах с разрывом петли ФАПЧ / А. В. Яновский, И. А. Третьяков, В. Ю. Подлесный, С. С. Антипов // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 3. – С. 3-8. – EDN YGGCLL.

Поступила в редакцию 20.03.2025 г., рекомендована к печати 09.04.2025 г.

COMPONENTS OF THE AUTOMATED SYSTEM OF SCIENTIFIC RESEARCH OF RADIO CHANNELS TEMPEST

Tretiakov I.A., Kulikova A.S., Dolbeshchenkova N.V., Stupak V.A.

In this paper, the main components are considered – the functional blocks of the developed ASRS of radio channels, their functional features, as well as the interaction between them. To provide an integrated approach to the study of radio channels, functional blocks for detecting electromagnetic radiation and leads, automated detection of information leakage channels, and the formation of a broadband barrier signal are proposed.

Keywords: ASRS, TEMPEST, radio channels, detection, detection, suppression.

Третьяков Игорь Александрович

кандидат технических наук, доцент, заместитель декана по научной работе, доцент кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: i.tretiakov@mail.ru

Tretiakov Igor Aleksandrovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Dean for Research, Associate Professor at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Куликова Анастасия Сергеевна

младший научный сотрудник кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: nastya.zhinkina@mail.ru

Kulikova Anastasiia Sergeevna

Junior Researcher at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Долбешенкова Наталья Вячеславовна

старший преподаватель кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: dolbeshenkova91@mail.ru

Dolbeshchenkova Natalia Viacheslavovna

Senior Lecturer at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Ступак Владимир Аврамович

старший научный сотрудник кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: v.a.s.19470415@gmail.com

Stupak Vladimir Avramovich

Senior Researcher at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД СЕГМЕНТАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ SLIC И RANDOM FOREST ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЛЕСНЫХ МАССИВОВ ПО ДАННЫМ ДЗЗ

© 2025 Несова А.В., Колесенков А.Н.

Рассматривается задача разработки метода сегментации изображений для выявления изменений в лесном покрове в целях дальнейшей разработки алгоритмов, которые применяются для решения задач мониторинга лесных массивов, в частности, мониторинга сплошных рубок леса. Целью данной работы является развитие метода сегментации изображений для применения в разработке алгоритмов для обнаружения и картирования сплошных рубок леса с использованием спутниковых данных среднего разрешения Sentinel-2. Сегментация изображений проводится с использованием алгоритма суперпиксельной сегментации SLIC, а точность работы проверяется с помощью алгоритма машинного обучения контролируемой классификации Random Forest и набор соответствующих метрик и эталонных образцов. Определение оптимальных начальных параметров метода сегментации изображений производилась на основании масок леса и рубок леса, полученных в результате работы с данными дистанционного зондирования Земли, различных вегетационных индексов (NDVI, EVI, NDWI) и т.д. Проведена успешная сегментация изображений на сегменты а в последующем на классы, где 1 – соответствуют вырубкам леса, а 0 – значениям леса, а визуальное представление работы алгоритма доказало успешную работу предложенного метода на тестовых данных.

Ключевые слова: метод сегментации изображений, леса, мониторинг, рубки леса, дистанционное зондирование Земли, SLIC, NDVI, Random Forest, контролируемая классификация.

Введение. Методы компьютерного зрения широко применяются в различных областях науки. Некоторые задачи компьютерного зрения подразумевают анализ изображений для выделения целевых объектов на изображениях и их границ, и является одним из важных этапов в обработке изображений [1].

Для этих поставленных задач, которые подразумевают акцентирование внимания на существенных деталях, и пренебрегать качеством несущественных на изображениях часто прибегают к использованию различных методов сегментации. При этом изображение разбивается на области или сектора, которые в свою очередь принадлежат к определенным классам и отличаются друг от друга по определенным признакам: цвету, структуре, текстурным признакам. Методы сегментации изображений применяются во многих областях, таких как: медицинская диагностика, для обнаружения опухолей и других патологий, определение объемов тканей, различных диагностик, планирование лечения; в задачах экологического мониторинга: выделении объектов на спутниковых снимках – рубок леса, пожаров, ветровалов, оползней, в системах безопасности для распознавания лиц, и отпечатков пальцев, в интеллектуальных транспортных системах в управлении дорожным движением, а также для обработки объектов видеопоследовательности при промышленном контроле качеством [2].

Работа выполнена в рамках молодежной лаборатории «Диагностика и механизмы адаптации природных и антропогенно-трансформированных экосистем Донбасса» (№ госрегистрации НИОКТР 1023110700153-4-1.6.19;1.6.11;1.6.12).

В задачах мониторинга лесных массивов, а именно в обнаружении сплошных рубок леса на космических снимках сегментация тоже играет одну из основных ролей. Так как известно, что сплошные рубки остаются одной из наиболее значимых угроз для лесных экосистем, приводя к потере биоразнообразия, изменению климата, и деградации почв.

Метод сегментации позволяет, выделить сплошные рубки леса на изображениях и оценить масштабы ущерба разделив изображение на интересующие сегменты. Так с развитием классических методов на основе вегетационных индексов описанных в работах [3], [4] и методов пороговой сегментации индексов (NDVI, EVI, SAVI) [5], которые остаются популярными благодаря простоте реализации широко развиваются методы сегментации которые несут в себе сочетание классических методов на основе спектральных индексов и методов машинного обучения, что повышает точность полученных данных и потерю ошибок и нейросетевых архитектур (Random Forest, U-Net) и т.д. [6-13] это актуально учитывая большие территории и большой объем данных.

Таким образом, методы сегментации изображений является одним из основных мощных инструментов для анализа космических снимков в задачах мониторинга сплошных рубок леса на основе данных и, масок полученных о рубках леса, и леса, тем самым облегчает задачи детектирования и выделения рубок и границ рубок на спутниковых снимках от всего изображения. Целью данной работы является развитие метода сегментации изображений для применения в разработке алгоритмов для обнаружения и картирования сплошных рубок леса с использованием спутниковых данных среднего разрешения Sentinel-2.

Постановка задачи. Исследовать метод сегментации изображений в задачах мониторинга сплошных рубок леса на космических снимках, с использованием алгоритма суперпиксельной сегментации SLIC и алгоритма машинного обучения контролируемой классификации Random Forest. В качестве входных данных были использованы космические снимки среднего разрешения Sentinel-2 территории лесного заказника «Великоанадольский лес» в Донецкой Народной Республике Российской Федерации, вегетационные индексы применимы в задачах мониторинга лесных массивов и различные спектральные каналы. Также за основу брались полученные маски леса и вырубок леса для высокой точности работы алгоритма и безошибочной проверки принадлежности сегментов изображения к определенному классу.

Теоретические исследования. В качестве метода сегментации был выбран метод SLIC (Simple Linear Iterative Clustering) из-за его адаптации специально под изображения и быструю работу алгоритма. Сам метод сегментации SLIC впервые предложен в 2012 году. [14] Сохраняя границы объектов, он группирует пиксели в компактные, однородные области (суперпиксели). Суперпиксель представляет собой группу соседних пикселей, похожих по цвету и текстуре на изображении. Это упрощает процесс обработки изображений, сокращая количество элементов для анализа (вместо миллионов пикселей -тысяча суперпикселей). Алгоритм сочетает в себе метод k-средних с пространственной близостью пикселей и состоит из следующих этапов:

1. Инициализация центроидов: изображение разбивается на сетку со следующим шагом: $s = \sqrt{N/k}$, где N – число пикселей, k – желаемое число суперпикселей. Центроиды (центры кластеров) размещаются в узлах сетки.
2. Коррекция центроидов: центроид смещается в точку с наименьшим градиентом в окрестности 3×3 (чтобы избежать попадания на границу объекта):

$$C_i \leftarrow \arg \min_{(x,y) \in N_i} \|\nabla(x,y)\|^2,$$

где N_i – локальная окрестность центроида C_i $\nabla(x,y)$ – градиент изображения в точке (x,y) .

3. Для каждого кластера назначаются пиксели, происходит это следующим образом: для каждого центроида рассматривается область $2S \times 2S$ вокруг него. Пиксели в этой области назначаются ближайшему центроиду на основе расстояния в 5D-пространстве: цвет (3D): $[L,a,b]$ (из цветового пространства CIELAB), координаты (2D): (x,y) (позиция пикселя). Расстояние вычисляется по формуле:

$$D = \sqrt{d_{lab}^2} + \left(\frac{m}{S}\right) d_{xy}^2,$$

где:

d_{lab}^2 – евклидово расстояние по цвету,

d_{xy}^2 – расстояние по координатам,

m – параметр компактности (чем больше m , тем важнее пространственная близость).

4. Затем происходит обновление центроидов: новый центроид вычисляется как среднее значение всех пикселей в кластере S_i :

$$C_i = \frac{1}{|S_i|} \sum_{\rho j \in S_i} \rho j.$$

5. Далее выполняется итеративное уточнение т.е. шаги 3–4 повторяются T раз (обычно $T=10$).

6. В конце происходит процесс постобработки, который включает в себя удаление мелких изолированных областей (например, слияние кластеров размером <10 пикселей на основе расстояния D).

SLIC — один из самых популярных методов суперпиксельной сегментации благодаря балансу между скоростью и качеством. Он особенно полезен в задачах, где важно сохранение границ объектов (например, анализ спутниковых снимков или медицинская диагностика).

Принадлежность кластеров к определенному классу на изображении, в данном случае к лесу и рубкам леса, будет определяться с помощью обучения модели на алгоритме классификации Random Forest – Случайный лес. Комбинация двух методов в данном случае SLIC (суперпиксельная сегментация) и Random Forest (случайный лес) представляет собой процесс классического конвейера обработки данных «пайплайна» - pipeline, для задач классификации изображений, особенно хорошо зарекомендовавший себя в дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ). Сам метод работает в 3 этапа: 1) на первом этапе происходит сегментация изображения на суперпиксели (SLIC); 2) далее на втором извлечение признаков для каждого суперпикселя; 3) в конце происходит классификация суперпикселей с помощью Random Forest.

Random Forest позволяет преодолеть ограничения попиксельной классификации, учитывая контекст и форму объектов. При использовании суперпикселей снижается влияние шумов и повышается скорость обработки, при этом сохраняются важные детали границ между различными типами земной поверхности. Теперь рассмотрим, как реализуется этот алгоритм для анализа космических снимков и выявления сплошных рубок леса. Сам алгоритм представлен на рисунке ниже (рис. 1), и состоит из следующих этапов:

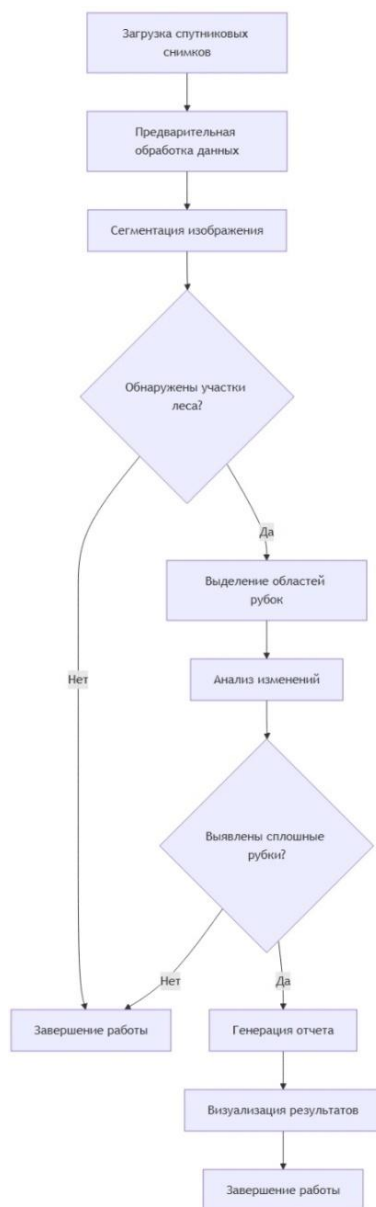


Рис. 1. Алгоритм сегментации для обнаружения сплошных рубок леса

1) На вход поступает космический снимок в виде RGB или мультиспектрального изображения, для каждого пикселя изображения $\rho(x, y)$ вычисляется расстояние между пикселем и центром суперпикселя:

$$D(\rho, C_i) = \sqrt{\frac{d_c^2}{(\Delta c)^2} + \frac{d_s^2}{(\Delta s)^2}},$$

где:

$d_c = \sqrt{\sum (I(\rho) - I(C_i))^2}$ - разница между цветовыми значениями пикселя ρ и центра суперпикселя C_i .

$d_c = \sqrt{(\rho_x - C_{ix})^2 + (\rho_y - C_{iy})^2}$ - евклидово расстояние между координатами пикселя ρ и центра суперпикселя C_i .

$\Delta c, \Delta s$ - нормализующие коэффициенты для цветового и пространственного расстояний.

И происходит разбиение изображения на сегменты с границами объектов. Далее путем применения метода сегментации SLIC получаем матрицу меток суперпикселей.

2) Затем извлекаем признаки для каждого суперпикселя:

2.1) спектральные признаки: средние значения каналов (R, G, B, NDVI, NIR и др.):

$$\mu_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_k(i),$$

где N — количество пикселей в суперпикселе, $I_k(i)$ — интенсивность канала k для i -го пикселя.

2.2) стандартное отклонение интенсивностей:

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_k(i) - \mu_k)^2},$$

2.3) текстурные признаки:

• энергия: $E = \sum_{i,j} P(i,j)^2$,

• контраст: $C = \sum_{i,j} |i - j|^2 P(i,j)$,

• энтропия (из матрицы GLCM): $H = -\sum_{i,j} P(i,j) \log(P(i,j))$.

3) Потом происходит обучение модели классификатора Random Forest на нашем датасете: полученных размеченных данных. Каждый суперпиксель в датасете имеет класс: "лес", "рубка", "вода" и т.д. Кросс-энтропия для обучения Random Forest:

$$L = -\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K y_{ik} \log(\rho_{ik}),$$

где:

• y_{ik} — истинная метка,

• ρ_{ik} — предсказанная вероятность.

4) Валидация результатов работы алгоритма происходит путем использования различных метрик, таких как:

• Аккуратность (общая точность):

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN},$$

• Precision:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP},$$

- Recall для каждого класса:

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN},$$

- IoU (Intersection over Union) для оценки сегментации:

$$IoU = \frac{TP}{TP + FP + FN},$$

5) На финальном этапе предсказанные классы накладываются на исходное изображение. Например, если суперпиксель имеет метку "лес", он закрашивается зеленым цветом, "вода" — синим и т.д.

Экспериментальные исследования. Метод сегментации изображений SLIC (Simple Linear Iterative Clustering) был использован для исходных данных – космических снимков лесных массивов – лесного заказника «Великоанадольский лес» в Донецкой Народной Республике Российской Федерации с целью автоматического обнаружения и детектирования вырубленных лесов на изображениях путем анализа признаков на изображениях и принадлежности их к определенному классу. На рисунке 2. представлено визуальное представление работы метода сегментации SLIC на тестовом изображении.

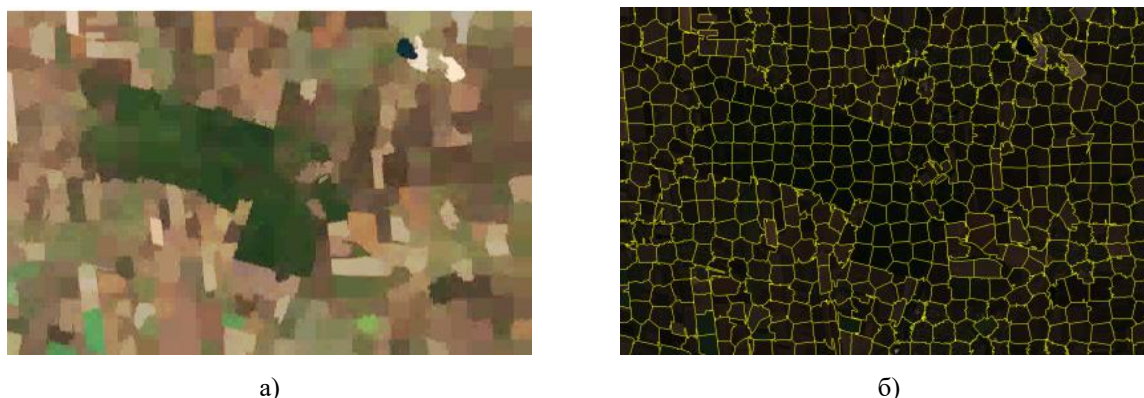


Рис. 2. Визуализация метода сегментации SLIC тестовом изображении: а) результат сегментации изображения, б) итоговое изображение в результате разбиения изображения на кластеры

На рисунке 2 мы видим результат разбиения изображения (космического снимка) на кластеры – сегменты, представляющие собой области интереса с сохраненными границами объектов и набором определенных признаков для последующей работы над изображением. Точность работы этого метода составила 0,93, что соответствует значению 93%, это характеризует собой высокие показатели работы алгоритма и точности срабатывания.

Представление результата работы комбинации двух методов, сегментации SLIC и алгоритма машинного обучения Random Forest о принадлежности кластеров изображения к определенному классу на основании масок, отображено на рисунке 3.

На представленном рисунке 3. мы видим разбиение изображения на определенные классы, согласно цветовой палитре и маскам леса и вырубкам. Так вырубки леса показаны фиолетовым цветом, а лес и лесные массивы желтым.

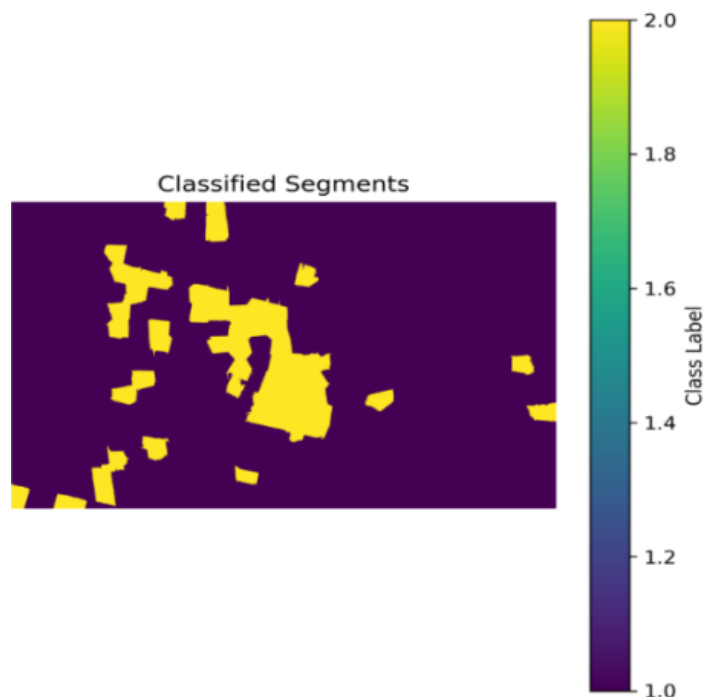


Рис. 3. Визуализация работы метода сегментации SLIC и классификатора Random Forest на тестовом изображении

Таким образом, используя данные методы в обработке данных дистанционного зондирования Земли, позволило разбить изображение на определенные кластеры – сегменты, и в последующем определить принадлежность данных сегментов к определенному классу, используя при этом в исследовании маски леса и вырубок леса. Это позволило получить коллекцию из вырубок леса и лесного массива, с различными признаками: значения вегетационных индексов и т.д. оценить площадь ущерба и визуально улучшить представление информации.

Далее планируется усовершенствовать данный алгоритм, добавления рисования полигонов, которые будут хранить в себе точные координаты лесных массивов на космических снимках, чтобы изменения в лесном массиве - вырубки леса, были отображены только в границах полигонов. Потому, что на рисунке 3 можно видеть, что из-за того, что показатели NDVI довольно низкие алгоритм машинного обучения Random Forest срабатывает так, что считает все вырубленным лесом.

Выводы. В ходе проведенного исследования была реализована методика сегментации изображений в сфере дистанционного зондирования Земли и мониторинга изменений в лесных массивах – сплошных рубок леса с использованием комбинации метода суперпиксельной сегментации SLIC и алгоритма машинного обучения Random Forest. Разработанный подход продемонстрировал высокую эффективность, достигнув точности 93% при валидации на тестовых данных, что существенно превосходит традиционные методы анализа.

Проведенный сравнительный анализ показал значительные преимущества предложенного решения. В отличие от традиционных методов, основанных исключительно на вегетационных индексах (NDVI, EVI) с точностью 70-85%, реализуемый подход обеспечивает более надежную классификацию за счет комплексного использования спектральных, текстурных и геометрических признаков, извлекаемых из суперпикселей. Это позволяет минимизировать влияние таких мешающих факторов, как облачность и сезонные изменения растительности.

Важным преимуществом метода является его вычислительная эффективность. В сравнении с попиксельной классификацией (точность 80-88%) подход с суперпикселями значительно сокращает объем обрабатываемых данных при сохранении четких границ объектов ($IoU > 0.85$ для класса "вырубки"). При этом он не требует таких значительных ресурсов, как методы глубокого обучения (например, U-Net), демонстрируя сопоставимую точность (93%) при существенно меньших вычислительных затратах.

Особого внимания заслуживают достигнутые показатели качества классификации:

Precision > 90% - минимальное количество ложных срабатываний

Recall > 88% - низкий процент пропущенных вырубок

В сравнении с аналогичными гибридными методами (например, графовая сегментация + SVM [7]) предложенный алгоритм показывает превосходство на 2–6% по точности и лучше сохраняет контуры объектов (см. рис. 2).

Полученные результаты включают не только качественную классификацию, но и количественные данные о каждой вырубке - значения спектральных индексов и точную площадь пораженных территорий. Это открывает новые возможности для детального анализа изменений лесного покрова и оценки экологического ущерба.

Для дальнейшего совершенствования алгоритма предлагается:

- расширить систему классов за счет включения типов древесных пород.
- оптимизировать параметры модели Random Forest.
- реализовать механизм полигонов для точного картографирования границ лесных массивов.

Разработанная методика представляет собой эффективный инструмент для мониторинга лесных экосистем, сочетающий высокую точность, вычислительную эффективность и устойчивость к помехам. Полученные результаты имеют важное значение для решения задач экологического мониторинга, управления лесными ресурсами и оценки антропогенного воздействия на природные экосистемы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Основные алгоритмы сегментации изображений учебное пособие / Д. Н. Тумаков, З. Д. Каюмов, А. Г. Маркина [и др.]. – Казань: Издательство Казанского университета, 2024 – 76 с.
2. Лукашик, Д. В. Анализ современных методов сегментации изображений / Д. В. Лукашик // Экономика и качество систем связи. – 2022. – Т. 2. – С. 57-65.
3. Tucker, C. J. Remote sensing of total dry-matter accumulation in winter wheat / C. J. Tucker // Remote Sensing of Environment. – 1981. – Vol. 11. – P. 267–277. – DOI 10.1016/0034-4257(81)90027-X.
4. Hansen, M. C. High-Resolution Global Maps of Forest Cover Change / M. C. Hansen, J. R. G. Townshend // Science. – 2013. – V. 342, № 6160. – P. 850–853. – DOI 10.1126/science.1244693.
5. A pixel-based Landsat compositing algorithm for large area forest cover mapping / J. C. White [et al.] // Remote Sensing of Environment. – 2014. – V. 140. – P. 23–31. – DOI 10.1016/j.rse.2013.08.016.
6. Барталев, С. А. Спутниковый мониторинг лесов России: современное состояние и перспективы / С. А. Барталев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2020. – Т. 17. – № 5. – С. 9-34. – DOI 10.21046/2070-7401-2020-17-5-9-34.
7. Егоров, В. А. Автоматизированная сегментация космических изображений для оценки сплошных рубок леса / В. А. Егоров, Е. А. Лупян, С. А. Барталев // Лесоведение. – 2019. – № 3. – С. 243-253. – DOI: 10.1134/S0024114819030039.
8. Can semantic labeling methods generalize to any city? The inria aerial image labeling benchmark / E. Maggiori [et al.] // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2017. – V. 55, №. 9. – P. 4776–4789. – DOI 10.1109/TGRS.2017.2693342.

9. Land Cover Classification via Multitemporal Spatial Data by Deep Recurrent Neural Networks / D. Ienco [et al.] // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2017. – V. 14, № 10. – P. 1685–1689. – DOI 10.1109/LGRS.2017.2728698.
10. Deep Learning for Remote Sensing Image Classification / P. Wang [et al.] // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2020. – V. 159. – P. 112–126. – DOI 10.1016/j.isprsjprs.2019.11.004.
11. Колесенков, А. Н. Алгоритмы сетевого анализа в геоинформационных системах мониторинга чрезвычайных ситуаций / А. Н. Колесенков, А. В. Несова // Вопросы науки. – 2015. – Т. 3. – С. 101–105. – EDN TQOONX.
12. Несова, А. В. Технология экологического мониторинга на основе обработки аэрокосмических снимков средствами генетических алгоритмов / А. В. Несова // Сборник тезисов участников Международного форума "Наука будущего-наука молодых". – 2015. – Т. 2. – С. 77–79.
13. Колесенков, А. Н. Оценка состояния объектов лесного хозяйства на основе реализации НВИ-подхода средствами математического моделирования / А. Н. Колесенков, А. В. Несова // Математические методы в технике и технологиях. – 2015. – № 9(79). – С. 139–141. – EDN YUCDCW.
14. SLIC Superpixels Compared to State-of-the-Art Superpixel Methods / R. Achanta [et al.] // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2012. – V. 34, № 11. – P. 2274–2282.

Поступила в редакцию 24.03.2025 г., рекомендована к печати 09.04.2025 г.

COMBINED APPROACH BASED ON SLIC METHOD AND RANDOM FOREST ALGORITHM FOR MONITORING FORESTS USING EARTH REMOTE SENSING DATA

Nesova A.V., Kolesenkov A.N.

The paper considers the problem of developing image segmentation method for detecting changes in forest cover for the purpose of further development of algorithms that are used to solve forest monitoring problems, in particular, monitoring clear-cutting. The aim of this work is to develop image segmentation method for use in developing algorithms for detecting and mapping clear-cutting using Sentinel-2 medium-resolution satellite. Image segmentation is performed using the SLIC superpixel segmentation algorithm, and the accuracy of the work is verified using the Random Forest supervised classification machine learning algorithm and a set of corresponding metrics and reference samples. Determination of the optimal initial parameters of the image segmentation method was made on the basis of forest and forest-cutting masks obtained as a result of working with Earth remote sensing data, various vegetation indices (NDVI, EVI, NDWI), etc. Successful segmentation of images into segments and then into classes was carried out, where 1 corresponds to forest clearings, and 0 corresponds to forest values, and a visual representation of the algorithm's operation proved the successful operation of the proposed method on test data.

Keywords: image segmentation method, forests, monitoring, forest clearings, Earth remote sensing, SLIC, NDVI, Random Forest, supervised classification.

Несова Арина Владимировна

младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории диагностики и прогнозирования экосистем Донбасса ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: arina.nesova@gmail.com

Nesova Arina Vladimirovna

Junior Researcher, Research Laboratory for Diagnostics and Forecasting of Donbass Ecosystems of Donetsk State University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

Колесенков Александр Николаевич

доктор технических наук, профессор кафедры космических технологий ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина», Российская Федерация, Рязань.
E-mail: kt.rsreu@yandex.ru

Kolesenkov Aleksandr Nikolaevich

Doctor of Technical Sciences, Professor at Department of Space Technologies of Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin, Russian Federation, Ryazan.

УПРАВЛЕНИЕ МИКРОПРОЦЕССОРНЫМ БЛОКОМ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

© 2025 *Баширова Э.М., Прахов И.В., Ушаков А.С., Ковальчук Г.Н.*

В настоящей статье дано описание программного продукта, предназначенного для мониторинга и анализа работы микропроцессорного терминала релейной защиты. Рассмотрена архитектура разработанного программного продукта, который поддерживает работу как с данными, получаемыми в реальном времени, так и симулированными, что обеспечивает удобство при его использовании. Также рассматривается использование искусственного интеллекта для прогнозирования критических событий.

Ключевые слова: разработка, релейная защита, микропроцессорный терминал, нейронная сеть, прогнозирование, анализ данных.

Введение. С каждым годом в России и мире растёт сложность электроэнергетической инфраструктуры, из-за чего количество аварийных ситуаций, связанных с отказами оборудования находится на высоком уровне. В предотвращении аварий особую роль играет релейная защита, обеспечивающая автоматическое отключение повреждённых участков электроэнергетической сети. Согласно статистике, срабатывает каждое третье устройство релейной защиты, из которых около 4% происходит некорректно [1].

На замену «традиционной» релейной защите, приходит «цифровая» (микропроцессорная) релейная защита [2]. Процесс передачи электроэнергии подвергается внешним воздействиям, что приводит к невозможности корректного функционирования большого количества систем без автоматического управления и анализа данных [3].

Устройства микропроцессорной релейной защиты основаны на микропроцессорных элементах, что позволяет внедрять в них различные модули, способные с помощью искусственного интеллекта проводить анализ множества получаемых данных. Внедрение таких модулей позволит точнее управлять электроэнергетическими сетями и учитывать различные условия их использования [4].

Описание учебного лабораторного стенда. Для отладки и тестирования программного продукта был собран учебный стенд на базе микропроцессорного терминала защиты «БЗП-01» (рис. 1).

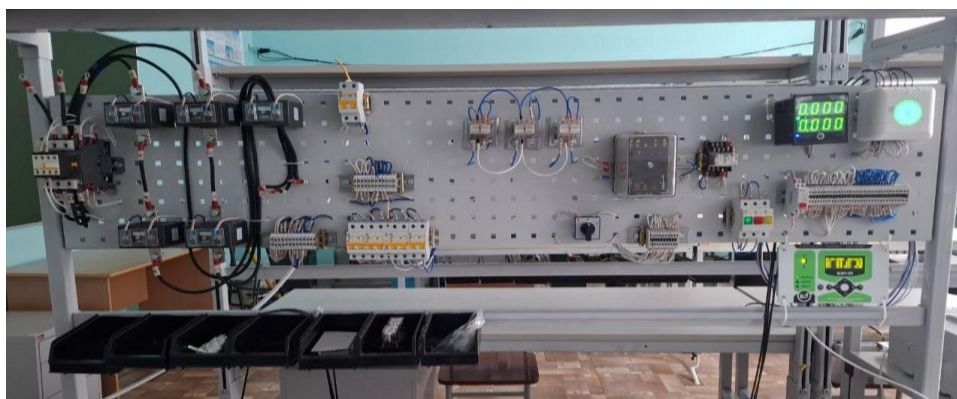


Рис. 1. Собранный учебный лабораторный стенд

Стенд предназначен для моделирования работы высоковольтного присоединения, включая управление виртуальным выключателем и проверку корректности работы защитных систем путём подачи токов, имитирующих короткое замыкание [5].

Описание архитектуры программного приложения. Программный продукт состоит из нескольких основных классов, каждый из которых выполняет свою определённую функцию (рис. 2).

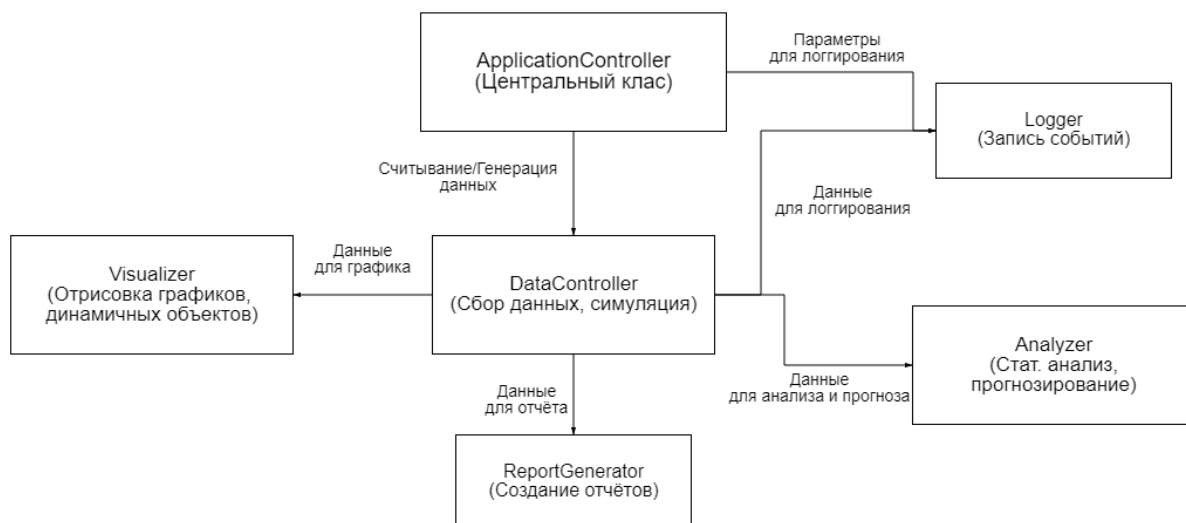


Рис. 2. Архитектура программного продукта

«ApplicationController» – это центральный класс, являющийся «точкой входа». Его основная задача – это инициализация и закрытие всех модулей, координация их работы контроль за памятью.

«DataController» – класс, отвечающий за подключение к терминалу по протоколу Modbus и считывание данных. В случае отсутствия подключения данные генерируются. Из этого класса данные передаются в другие, использующие их в своей работе.

Например, «Visualizer» – класс, отвечающий за графическое отображение получаемых данных в реальном времени. В этом классе строятся графики, обновляются оси времени и обрабатываются действия пользователя с графическими элементами (например, масштабирование графика).

«Analyzer» – класс, который получает данные от «DataController» и производит:

- статистическую обработку. Рассчитывает среднее значение аварийных ситуаций, определяет аномальные точки по заданным порогам;
- прогнозирование с использованием искусственного интеллекта. Прогноз происходит на основе заранее обученной модели, и предсказывает вероятное наступление аварийных ситуаций в определённое время.

Класс «ReportGenerator» отвечает за формирование отчётов в выбранном пользователем формате (рис. 3). Возможна выгрузка в формате «HTML», «CSV» и «TXT». Такой отчёт включает в себя:

- количество накопленных точек данных, количество аварийных ситуаций;
- текущие уставки;
- путь до отчёта.

Отчёт о работе системы БЗП

Дата и время: Sat Mar 8 18:21:03 2025

Параметры симуляции

Всего точек накоплено: 217

Среднее значение: 4.86

Количество аномалий (>7): 60

Текущий порог ИИ

Макс. критический порог: 8.00

События превышения порога (Значение ; Время)

9.38 ; 0.65
9.52 ; 1.46
9.57 ; 2.06
9.91 ; 2.87

Рис. 3. Пример сформированного отчёта в формате «HTML»

Класс «Logger» предназначен для записи ключевых событий в программном продукте. Это данные о событиях запуска или остановки симуляции, подключения к терминалу, создание отчётов, прогнозирование и возможные ошибки в ходе работы.

Описание разработанного программного приложения. Для взаимодействия с терминалом «БЗП-01» используется протокол «Modbus». Это коммуникационный протокол, имеющий архитектуру «master-slave» (также известный, как «ведущий-ведомый»). Для передачи пакетов данных используется интерфейс «RS-485».

Разработанное программное приложение имеет интерфейс для взаимодействия с пользователем. После запуска пользователь увидит вкладку «Настройки» и вложенные вкладки «Общие» и «РЗиА» (рис. 4). Во вкладке «Общие» пользователь сможет задать различные параметры, например, подключения по протоколу Modbus к терминалу.

Рис. 4. Вкладка с настройками

При подключении к терминалу требуется учесть наличие в нём пароля, который потребуется ввести. После ввода пароля будет отправлена команда на его запись в регистр. В случае успешного ввода отобразится уровень доступа.

Установка параметров в «Цепи тока» также влияет на уставки самого терминала. Важно корректно подобрать эти параметры, так как от них зависит, когда сработает защита.

В программном продукте также есть возможность настройки параметров осциллографирования. Параметр «Точек на период» определяет, насколько детально будет виден сигнал на графике. что отразится при работе с осциллограммой в одноимённой вкладке «Осциллограмма». Параметр «Длительность записи, с» определяет количество времени, которое будет записано с конца.

Во вкладке «Осциллограмма» расположен график, на котором в режиме реального времени можно отслеживать значения считываемых токов (рис. 5).

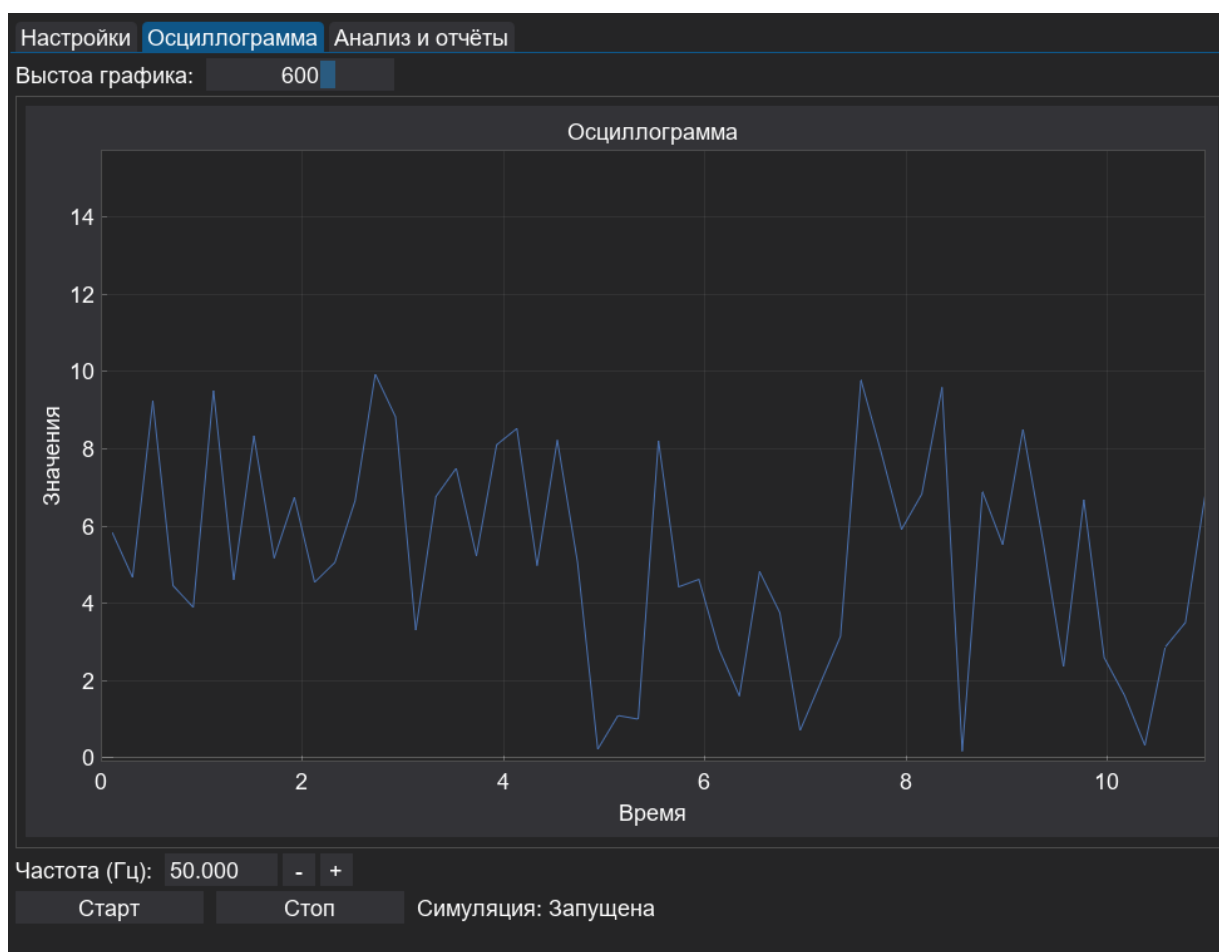


Рис. 5. Вкладка с осциллограммой

Регулируя ползунок «Высота графика» можно увеличивать или уменьшать высоту графика по вертикали. В поле «Частота (Гц)» можно регулировать частоту, с которой строится график.

Кнопки «Старт» и «Стоп» отвечают за то, рисуется ли сейчас график или нет. В случае, если подключение к стенду отсутствует, будет соответствующая надпись: «Симуляция: Запущена» или «Симуляция: Остановлена».

Во вкладке «Анализ и отчёты» в верхней части находится панель анализа, где пользователь может задать пороговое значение для обнаружения критических ситуаций (рис. 6).

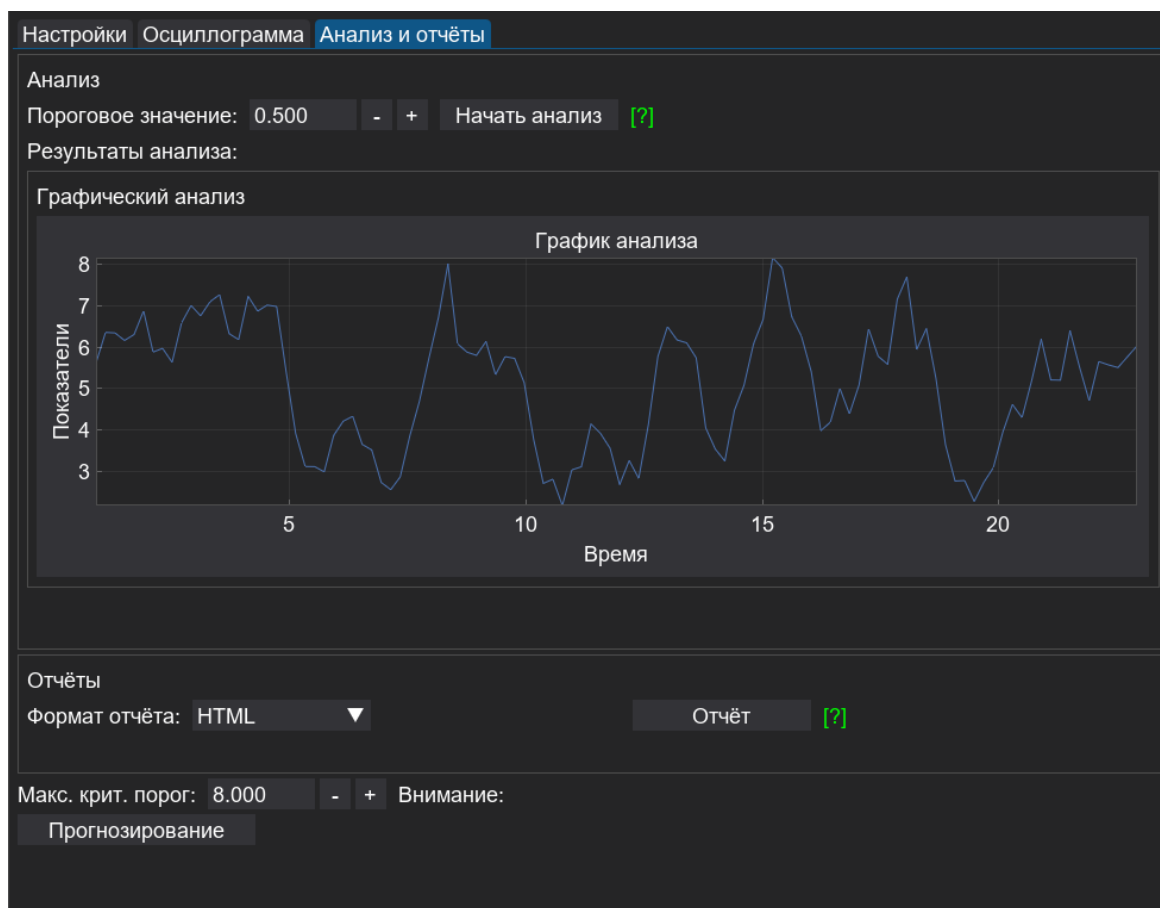


Рис. 6. Вкладка «Анализ и отчёты»

При нажатии кнопки «Начать анализ» будет вычислено среднее арифметическое и определена частота возникновения критических ситуаций. Результат вычислений будет выведен в отдельных полях, позволяющих оценить стабильность показателей (рис. 7).

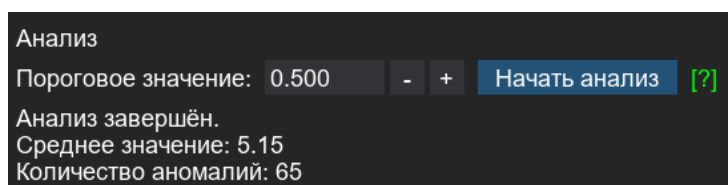


Рис. 7. Результаты анализа

Также реализована динамическая визуализация в режиме реального времени. График отображает скользящее среднее значение, вычисляемое по окну из пяти последовательных точек, что позволяет отслеживать тренд изменения параметров.

Нижняя часть вкладки предназначена для формирования отчётов в одном из трёх возможных вариантов из выпадающего списка (рис. 8).

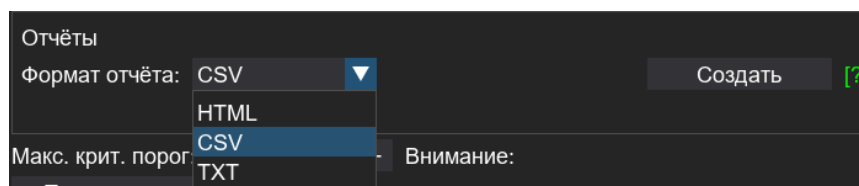


Рис. 8. Выпадающее меню выбора формы

При нажатии на кнопку «Создать» автоматически соберутся ключевые метрики (), сформируется отчёт в выбранном формате, сохранится в папку «Отчёты» по расположению проекта, а также будет автоматически открыт с помощью установленного на персональном компьютере приложения по умолчанию. Путь до отчёта будет дополнительно продублирован в отдельном текстовом поле (рис. 9).

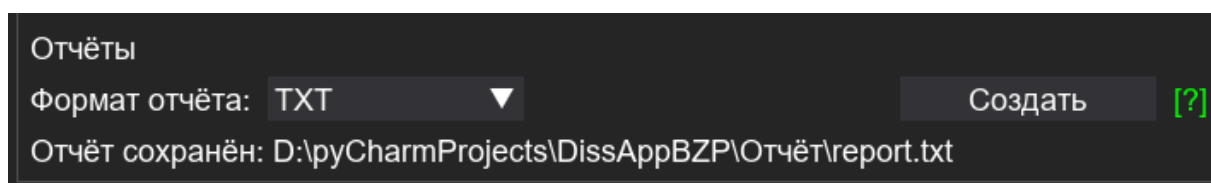


Рис. 9. Отображение пути после создания отчёта

Для прогнозирования используется рекуррентная нейронная сеть «TensorFlow», обрабатывающая показатели времени и считываемых значений.

Нейронная сеть содержит несколько слоёв:

- первый слой имеет 64 нейрона и принимает входную последовательность данных;
- второй слой имеет 32 нейрона, нелинейно обрабатывает и сворачивает последовательность в векторное представление;
- третий (выходной) слой содержит количество нейронов, равное числу прогнозируемых временных шагов. Прогноз строится на 16 временных шагов, следовательно, слой содержит 16 нейронов.

Обучение нейронной сети происходит 30 эпох. Для прогнозирования времени, в которое вероятнее всего будет критическое событие нужно задать порог (по умолчанию считывается текущий порог с терминала). При нажатии на кнопку «Прогнозирование» выйдет время, в которое вероятнее всего будет превышен порог (рис. 10).

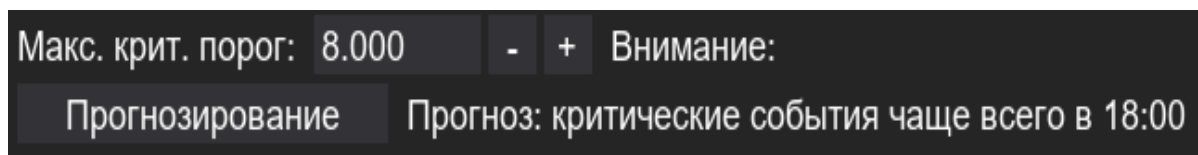


Рис. 10. Прогнозирование времени возникновения критических ситуаций

При нажатии кнопки «Интервальное прогнозирование» будет спрогнозировано множество точек, которые будут отображены на графике (рис. 11).



Рис. 11. Интервальное прогнозирование, отображённое на графике

Для исключения ошибочных ситуаций при обучении, когда не хватает данных установлено условие, что количество точек для обучения не должно быть меньше 300.

Выводы. Разработанный программный продукт представляет собой удобный инструмент для мониторинга и анализа работы микропроцессорного терминала релейной защиты «БЗП-01». Благодаря возможности симуляции данных программу можно использовать отдельно от учебного стенда. Внедрённый искусственный интеллект позволяет прогнозировать возможные аварийные ситуации и проводить анализ на основе накопленных данных. Формирование отчётов позволит эффективно отслеживать процесс работы терминала и его параметров.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Умные приборы учета газа, воды и электроэнергии [Электронный ресурс]. – URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Умные_приборы_учета_газа_воды_и_электроэнергии (дата обращения 15.02.2025).
2. Устройство РЗА [Электронный ресурс]. – URL: <https://i-mt.net/ustrojstvo-rza/> (дата обращения 16.02.2025).
3. Королев, М. А. Внедрение искусственного интеллекта в измерительные приборы для исключения погрешностей, вызванных внешней средой / М. А. Королев, М. Ф. Шван // Интеграция науки и образования в вузах нефтегазового профиля - 2024: Материалы Международной научно-методической конференции, Салават, 22-26 апреля 2024 года. – Салават: УНПЦ "Издательство УГНТУ", 2024. – С. 367-368. – EDN LXUZUJ.
4. Никитин, А. В. Применение нейронной сети в имитационно-моделирующем комплексе на базе технических средств "ОВЕН" / А. В. Никитин, Л. В. Сушенцов, Э. М. Баширова // Интеграция науки и образования в вузах нефтегазового профиля - 2024 : Материалы Международной научно-методической конференции, Салават, 22–26 апреля 2024 года. – Салават: УНПЦ "Издательство УГНТУ", 2024. – С. 243-245. – EDN LAECLQ.
5. Диагностика технического состояния электрооборудования систем электроснабжения. Общие вопросы и физические основы методов диагностики: Учебное пособие / В. А. Шабанов, М. Г. Баширов, П. А. Хлюпин [и др.]. Том Часть 1. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2018. – 288 с. – ISBN 978-5-7076-1955-0. – EDN AHFYOU.

Поступила в редакцию 28.03.2025 г., рекомендована к печати 11.04.2025 г.

CONTROL OF MICROPROCESSOR RELAY PROTECTION UNIT USING MACHINE LEARNING

Bashirova E.M., Prakhov I.V., Ushakov A.S., Kovalchuk G.N.

This article describes a software product for monitoring and analysing the operation of microprocessor relay protection terminal. The software product supports work with real-time and simulated data, which provides convenience in its use. The use of artificial intelligence for prediction of critical events is also considered.

Keywords: development, relay protection, microprocessor terminal, neural network, prediction, data analysis.

Баширова Эльмира Муссаевна

кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования и автоматики промышленных предприятий ФГБОУ ВО ИНН «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,
Российская Федерация, Республика Башкортостан, г. Салават.

E-mail: ushakovv.as@yandex.ru

Bashirova Elmira Mussaevna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises of Ufa State Petroleum Technological University,
Russian Federation, Republic of Bashkortostan, Salavat.

Прахов Иван Викторович

кандидат технических наук, доцент кафедры электрооборудования и автоматики промышленных предприятий ФГБОУ ВО ИНН «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,
Российская Федерация, Республика Башкортостан, г. Салават.

E-mail: ushakovv.as@yandex.ru

Prakhov Ivan Viktorovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises of Ufa State Petroleum Technological University,
Russian Federation, Republic of Bashkortostan, Salavat.

Ушаков Артем Сергеевич

студент кафедры электрооборудования и автоматики промышленных предприятий ФГБОУ ВО ИНН «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,
Российская Федерация, Республика Башкортостан, г. Салават.

E-mail: ushakovv.as@yandex.ru

Ushakov Artem Sergeevich

Student of the Department of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises of Ufa State Petroleum Technological University,
Russian Federation, Republic of Bashkortostan, Salavat.

Ковальчук Григорий Николаевич

студент кафедры электрооборудования и автоматики промышленных предприятий ФГБОУ ВО ИНН «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,
Российская Федерация, Республика Башкортостан, г. Салават.

E-mail: grigoriy.kovalchuk@mail.ru

Kovalchuk Grigorii Nikolaevich

Student of the Department of Electrical Equipment and Automation of Industrial Enterprises of Ufa State Petroleum Technological University,
Russian Federation, Republic of Bashkortostan, Salavat.

ПРЕДСТАВИМОСТЬ КЛАССОВ АВТОМАТОВ МИЛИ В ТЕРМИНАХ БЭРОВСКИХ И Р-АДИЧЕСКИХ МЕТРИК

© 2025 Максименко И.И.

В данной работе исследуются контрольные эксперименты в потенциально бесконечных классах синхронных, асинхронных и обобщенных автоматов Мили. Сформулированы критерии существования экспериментов в терминах предельных множеств специального «бэровского» метрического пространства. Показано, что аналогичные критерии выполнены также и для р-адических метрик, что подтверждает «адельную» демократию контрольных экспериментов.

Ключевые слова: синхронный, асинхронный, автомат Мили, предельное множество, бэровская метрика, р-адическая метрика.

Введение. Одной из ключевых проблем в области исследования дискретных систем управления является идентификация объекта (автомата, взвешенного графа или языка) из априорно заданного потенциально бесконечного класса объектов.

Для конечных классов автоматов были получены фундаментальные результаты [1-3]. В частности, И.С. Грунский в своей работе [2] впервые представил концепцию идентификаторов, которые позволяют восстанавливать внутренние состояния автомата. Для анализа этих идентификаторов было введено понятие фрагмента с гомоморфизмом к исследуемому автомату, а также противоположное понятие кофрагмента, отражающее запрещенное поведение автомата. В этой работе также было предложено новое определение идентификатора автомата, который позволяет однозначно восстановить его компоненты.

На основе понятий фрагмента и кофрагмента было введено ключевое понятие представления автомата-эталона в контексте фиксированного класса автоматов, представляющее собой пару «фрагмент-кофрагмент» [3]. Эта пара позволяет однозначно выделить автомат из заданного класса автоматов и автомата-эталона. В классических исследованиях [2, 3] были подробно рассмотрены критерии существования таких представлений.

В работах [4, 5] был впервые предложен подход к исследованиям экспериментов в классах автоматов Мили, основанный на их представлении совокупностью конструктивных окрестностей в «бэровских» метрических пространствах. Позже этот метод был перенесен на произвольные неструктурированные множества дескрипторов [6], специализированные алгебраические структуры [7], алгебры Клини общего вида [8, 9] и решетки со сложностью [10].

Данная статья идеологически перекликается с результатами исследований [11, 12], в которых рассматривается идентификация экспериментальных объектов.

Целью настоящей статьи является обобщение вышеперечисленных подходов на различные модификации автоматов Мили (синхронные, асинхронные и обобщенные) на основе идентификации классов с эталоном в терминах специальных метрических «бэровских» пространств. Показано, что существует в некотором смысле «адельная» демократия для широкого набора р-адических метрик, относительно которых контрольные эксперименты инвариантны.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ФГБНУ ИПММ (проект № FREM-2023-003) Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Статья состоит из введения, четырех разделов и выводов. В первом разделе введены необходимые понятия и определения. Во втором разделе исследованы свойства контрольных экспериментов с синхронными автоматами Мили. В третьем разделе изучены контрольные эксперименты в классах асинхронных автоматов Мили. В четвертом разделе впервые рассмотрены контрольные процессы на классах обобщенных автоматов Мили.

В основных разделах статьи приведены критерии существования представлений в терминах предельных множеств для «бэровских» и r -адических метрик.

Основные понятия и определения. Приведем основные понятия и обозначения из теории множеств, графов и автоматов [2, 3].

Под автоматом Мили будем понимать систему вида $A = (S, X, Y, \delta, \lambda, s_0)$, где S, X, Y – конечные алфавиты состояний, входов и выходов соответственно, $\delta \subseteq S \times X \times S$ – функция переходов, а $\lambda \subseteq S \times X \times Y$ – функция выходов, $s_0 \in S$ – инициальное состояние. [3].

Через $A(U)$ обозначим класс всех конечных (синхронных) всюду определенных, инициально связных, детерминированных автоматов Мили над внешним алфавитом $U = X \times Y$.

Асинхронным автоматом Мили назовем систему вида $A = (S, X, Y, \delta, \lambda, s_0)$, где S, X – конечные алфавиты состояний и входов соответственно, Y – счетный алфавит выходов, $\delta \subseteq S \times X \times S$ – функция переходов, а $\lambda \subseteq S \times X \times Y$ – функция выходов, $s_0 \in S$ – инициальное состояние. Данное понятие обобщает классическое понятие асинхронного автомата [2], в котором на входной символ автоматом может реагировать словом из выходного алфавита.

Если функция переходов частичная, тогда можно ввести фиктивную вершину [1], в которую осуществляется переход по недостающим входным символам из всех вершин автомата, что позволяет всегда считать функцию переходов всюду определенной. Если автомат $A = (S, X, Y, \delta, \lambda, s_0)$ является недетерминированным, тогда его можно преобразовать в детерминированный автомат, используя процедуру детерминизации [2]. Далее будем полагать автомат $A = (S, X, Y, \delta, \lambda, s_0)$ инициально связным, всюду определенным, детерминированным автоматом Мили [3].

Пусть $A_d(U)$ – класс всех асинхронных всюду определенных, инициально связных, детерминированных автоматов Мили над внешним алфавитом $U = X \times Y$.

Введем также в рассмотрение динамический класс автоматов Мили $D(U, A_0)$. Класс порождается эффективно как некоторое дерево, в вершине которого стоит фиксированный «эталонный» автомат A_0 , а дуги дерева отмечены некоторой элементарной операцией «поломки», выбираемой из конечного множества операций (например, смена отметки дуги, перебрасывание дуги на другую вершину, стирание дуги и т.д.), которая не увеличивает число состояний «эталонного» автомата.

Тогда класс $D(U, A_0)$ содержит ровно тем автоматы, которые стоят в вершинах данного дерева с детерминизацией и пополнением до всюду определенности при необходимости. Класс $D(U, A_0)$ может быть потенциально бесконечным в силу счетности выходного алфавита Y .

Далее, если понятия не отличаются для класса синхронных и асинхронных автоматов, будем обозначать класс как $A(U)$.

Алгоритм-экспериментатор назовем контрольным экспериментом относительно априорно заданного потенциально бесконечного класса $F \subseteq A(U)$ и автомата-эталона $A \in A(U)$, если в результате проведения такого эксперимента с «черным ящиком» из класса на выходе алгоритма получаем ответ на вопрос, изоморфен «черный ящик» автомату-эталону или нет.

Контрольным экспериментом относительно априорно заданного класса $F \subseteq A(U)$ и автомата-эталона $A \in A(U)$ является такое множество вход-выходных слов $W \subseteq L_A$, что из включения $W \subseteq L_B$ для некоторого $B \in F$, вытекает $A = B$.

Множество всех вход-выходных слов автомата A длины не больше k обозначим через L_A^k . Для исследования свойств контрольных экспериментов в классе автоматов $A(U)$ введем специальную «бэровскую» метрику β [4], полагая, что $\beta(A, B) = 0$, если $A = B$ и $\beta(A, B) = \frac{1}{k}$, где $L_A^k \neq L_B^k$ и $L_A^{k-1} = L_B^{k-1}$. Также будем рассматривать семейство p -

адических метрик β_p , что $\beta_p(A, B) = 0$, если $A = B$ и $\beta_p(A, B) = \frac{1}{p^k}$, где $L_A^k \neq L_B^k$ и $L_A^{k-1} = L_B^{k-1}$, где p - произвольное простое число, большее или равное мощности множества X . В дальнейшем любую из таких «бэровских» или p -адических метрик обозначим символом α .

Окрестностью с центром $A \in (A(U), \alpha)$ и радиусом $r \in R^+$ назовем следующее множество автоматов $O_r(A) = \{B \mid \alpha(A, B) < r\}$. Автомат $A \in (A(U), \alpha)$ является предельным автоматом класса $F \subseteq A(U)$, если для произвольного $r > 0$ класс автоматов $O_r(A) \cap (F - \{A\})$ не пуст. Класс $F \subseteq A(U)$ называется открытым классом в пространстве $(A(U), \alpha)$, если в нем нет ни одного предельного автомата.

Обобщенным автоматом Мили назовем систему вида $A = (S, X, Y, \delta, \lambda, s_0, F)$, где S, X, Y – счетные алфавиты состояний, входов и выходов соответственно, $\delta \subseteq S \times X \times S$ – функция переходов, а $\lambda \subseteq S \times X \times Y$ – функция выходов, $s_0 \in S$ – начальное состояние, а $F \subseteq S$ – множество финальных состояний. Алфавиты S, X, Y могут быть конечными и функция переходов в общем случае частична. Если функция переходов частичная, тогда можно ввести фиктивную вершину [3], в которую осуществляется переход по недостающим входным символам из всех вершин автомата, что позволяет всегда считать функцию переходов всюду определенной.

Через $A_g(U)$ обозначим класс всех обобщенных всюду определенных, изначально связных, детерминированных автоматов Мили над внешним алфавитом $U = X \times Y$. Процесс-экспериментатор (алгоритм с оракулом) называется контрольным процессом относительно априорного класса $F \subseteq A_g(U)$ и автомата-эталона $A \in A_g(U)$, если в результате эксперимента с «черным ящиком» из класса этот процесс определяет, изоморфен «черный ящик» эталону или нет. Заметим, что в общем случае данный процесс не является алгоритмическим, а принадлежит классу алгоритмов с оракулом «останова». Формально, мы можем называть контрольным процессом относительно класса $F \subseteq A_g(U)$ и автомата-эталона $A \in A_g(U)$ такое потенциально бесконечное множество вход-выходных слов $W \subseteq L_A$, что из включения $W \subseteq L_B$ для некоторого $B \in F$ вытекает изоморфизм $A = B$.

Заметим, что множество L_A^k всех вход-выходных слов длины не больше k может быть и бесконечным в отличие от случая конечных автоматов.

Контрольный процесс $W \subseteq L_A$ назовем финитным, если существует такое натуральное число k , для которого выполнено включение $W \subseteq L_A^k$. Нетрудно видеть, что конечный контрольный процесс финитен, обратное утверждение в общем случае не верно.

Контрольные эксперименты с синхронными автоматами. Для метрического пространства автоматов Мили $(A(U), \beta)$ справедлив следующий метрический критерий существования контрольного эксперимента:

Теорема 1. *Множество вход-выходных слов L_A^k для некоторого натурального числа k является контрольным экспериментом относительно класса $F \subseteq A(U)$ и автомата-эталона $A \in A(U)$ тогда и только тогда, когда автомат A не является предельной точкой класса F в «бэровском» метрическом пространстве $(A(U), \beta)$.*

Данную теорему иногда удобно использовать в форме эквивалентного утверждения:

Утверждение 2. *Множество вход-выходных слов L_A^k для некоторого натурального числа k является контрольным экспериментом относительно класса $F \subseteq A(U)$ и автомата-эталона $A \in A(U)$ точно тогда, когда выполнено соотношение $O_{\frac{1}{k}}(A) \cap F \subseteq \{A\}$ в «бэровском» метрическом пространстве $(A(U), \beta)$.*

Справедливо топологическое следствие 3:

Следствие 3. *Всегда существует контрольный эксперимент для открытого класса автоматов $F \subseteq A(U)$ и автомата-эталона $A \in A(U)$ в метрическом пространстве автоматов $(A(U), \beta)$.*

Для ряда финитно-определенных классов автоматов [5] построение открывания класса является конструктивным, что позволяет строить эффективные контрольные эксперименты из следствия 3 для финитно-определенных классов автоматов $F \subseteq A(U)$.

Для конечных классов всегда справедлив следующий результат:

Следствие 4. *Для конечного класса $F \subseteq A(U)$ и автомата-эталона $A \in A(U)$ всегда существует алгоритм построения контрольного эксперимента.*

Для произвольных потенциально бесконечных классов изучение свойств контрольных экспериментов часто носит не конструктивный характер и в общем случае теория таких экспериментов далека от завершения [3,4]. Однако, автором в [5] найден ряд не тривиальных финитно-определенных потенциально бесконечных классов, для которых существует алгоритм построения контрольных экспериментов.

Контрольные эксперименты в классах асинхронных автоматов. Для класса всех асинхронных автоматов Мили справедливо следующее утверждение о невозможности построения контрольных экспериментов:

Утверждение 5. *Для класса $A_a(U)$ и произвольного автомата-эталона $A \in A_a(U)$ в общем случае не существует контрольный эксперимент.*

Для динамического потенциально бесконечного класса $D(U, A_0)$ выполнено противоположное утверждение:

Утверждение 6. *Для класса $D(U, A_0)$ и любого автомата-эталона $A \in A_a(U)$ всегда существует контрольный эксперимент.*

Для «бэровской» метрики в классе асинхронных автоматов Мили $(A_q(U), \beta)$ справедлив следующий критерий существования контрольного эксперимента [5]:

Теорема 7. Множество вход-выходных слов L_A^k для некоторого натурального числа k является контрольным экспериментом относительно класса $F \subseteq A_q(U)$ и автомата-эталона $A \in A_q(U)$ тогда и только тогда, когда выполнено соотношение $O_{\frac{1}{k}}(A) \cap F \subseteq \{A\}$ в «бэровском» метрическом пространстве $(A_q(U), \beta)$.

Для асинхронных автоматов Мили выполнено утверждение об «адельной» демократии контрольных экспериментов:

Утверждение 8. Для любого класса $F \subseteq A_q(U)$ и автомата-эталона $A \in A_q(U)$ существует контрольный эксперимент в «бэровском» метрическом пространстве $(A_q(U), \beta)$ тогда и только тогда, когда существует некоторый контрольный эксперимент в p -адическом пространстве $(A_q(U), \beta_p)$ для любого простого числа p , превышающего мощность множества X .

Из теоремы 7 вытекают следующие следствия, аналогичное таким же результатам для конечных автоматов:

Следствие 9. Для любого открытого класса $F \subseteq A_q(U)$ и автомата-эталона $A \in A_q(U)$ множество контрольных экспериментов не пусто.

Для конечных классов выполнено следующее следствие теоремы 7, аналогичное результату о синхронных автоматах:

Следствие 10. Для конечного класса $F \subseteq A_q(U)$ и автомата-эталона $A \in A_q(U)$ всегда существует алгоритм построения контрольного эксперимента.

Контрольная представимость для обобщенных автоматов. Для обобщенных автоматов Мили имеет место следующее утверждение, которое в общем случае не выполнено для классов синхронных и асинхронных автоматов Мили:

Утверждение 11. Для произвольного класса $F \subseteq A_g(U)$ и автомата-эталона $A \in A_g(U)$ всегда существует некоторый контрольный процесс.

Отметим, что в общем случае данный контрольный процесс не финитен. Это утверждение характеризует существенное отличие финитных и конечных контрольных экспериментов. Для «бэровской» метрики в классе автоматов Мили $(A_g(U), \beta)$ справедлив следующий критерий существования финитного контрольного процесса:

Теорема 12. Множество вход-выходных слов L_A^k для некоторого натурального числа k является контрольным процессом относительно класса $F \subseteq A_g(U)$ и автомата-эталона $A \in A_g(U)$ тогда и только тогда, когда A не является предельной точкой F в метрическом пространстве $(A_g(U), \beta)$.

Для обобщенных автоматов Мили имеет место интересное утверждение об «адельной» демократии контрольных процессов:

Утверждение 13. Для любого потенциально бесконечного класса $F \subseteq A_g(U)$ и автомата-эталона $A \in A_g(U)$ существует контрольный процесс в «бэровском» метрическом пространстве $(A_g(U), \beta)$ тогда и только тогда, когда существует некоторый контрольный процесс в p -адическом пространстве $(A_g(U), \beta_p)$ для произвольного простого числа p , превышающего мощность множества X .

Структура контрольных процессов имеет решеточную структуру, что позволяет рассматривать контрольные эксперименты в терминах специализированных решеток [10]:

Утверждение 14. Для произвольного потенциально бесконечного класса $F \subseteq A_g(U)$ и автомата-эталона $A \in A_g(U)$ множество всех контрольных процессов является верхней полной полурешеткой относительно операции объединения.

Множество финитных контрольных экспериментов также является верхней полурешеткой:

Утверждение 15. Для любых класса $F \subseteq A_g(U)$ и автомата-эталона $A \in A_g(U)$ множество всех финитных контрольных процессов или пусто или является верхней полурешеткой относительно операции объединения.

Отметим, что для финитных контрольных экспериментов полурешетка в общем случае не является полной.

Для открытых классов из теоремы 12 вытекает следствие, аналогичное результату для синхронных и асинхронных автоматов Мили:

Следствие 16. Для любых открытого класса $F \subseteq A_g(U)$ и автомата-эталона $A \in A_g(U)$ множество финитных контрольных процессов не пусто.

Теоремы 7 и 12 позволяют говорить о наличии некоторого общего критерия существования контрольных экспериментов, аналогичного критерию для классов автоматов [4], неструктурированных объектов [6], алгебраических систем специального вида [7], алгебр Клини на полукольцах [8, 9] и решеток со сложностью [10].

Выводы. В данной работе исследования контрольных экспериментов обобщены на потенциально бесконечные классы синхронных, асинхронных и обобщенных автоматов Мили с сохранением центрального критерия существования контрольных экспериментов в терминах «бэровской» и r -адических метрик.

Одним из интересных классов автоматов является потенциально бесконечный динамический класс автоматов $D(U, A_0)$, который может быть распознан рекурсивно перечислимое множество контрольных экспериментов [4] и требует дальнейших исследований.

Еще одним направлением будущих исследований является адаптация элементов теории экспериментов с автоматами к нейронным сетям. Это расширение потенциально возможно в силу того факта, что асинхронные автоматы способны моделировать любые непрерывные функции.

В данной работе продемонстрировано, что контрольные эксперименты сохраняют инвариантность относительно «бэровских» и r -адических метрик.

Следует отметить, что рассмотренные синхронные, асинхронные и обобщенные автоматы Мили можно рассматривать как цифровые двойники различных технических и программных устройств (микросхемы, программные комплексы, языки спецификаций и др.).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кудрявцев, А. Б. Введение в теорию автоматов / А. Б. Кудрявцев, С. В. Алешин, А. С. Подколзин. – М.: Наука, 1985. – 320 с.
2. Грунский, И. С. Представления конечных автоматов фрагментами поведения / И. С. Грунский, В. А. Козловский, Г. Г. Пономаренко. – Киев: Наук. думка, 1990. – 232 с.
3. Грунский, И. С. Синтез и идентификация автоматов / И. С. Грунский, В. А. Козловский. – Киев.: Наук. думка, 2004. – 245 с.

4. Максименко, И. И. Эксперименты в финитно-определенных метрических пространствах автоматов: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.01.09 / Максименко Игорь Иванович ; СГУ. – Саратов, 2000. – 16 с.
5. Максименко, И. И. Распознавание в эффективно-заданных классах автоматов / И. И. Максименко // Труды института прикладной математики и механики. – 1998. – Т. 2. – С. 115-123.
6. Грунский, И. С. Распознавание неструктурированных объектов / И. С. Грунский, И. И. Максименко // Труды института прикладной математики и механики. – 2010. – Т. 21. – С. 76-85.
7. Максименко, И. И. Финитные представления в алгебраических системах / И. И. Максименко // Труды института прикладной математики и механики. – 2011. – Т. 18. – С. 56-67.
8. Максименко, И. И. Распознавание в алгебрах Клини на идемпотентных полукольцах / И. И. Максименко, В. Н. Котенко // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 3. – С. 24-32. – EDN XVBVYW.
9. Максименко, И. И. Алгебраические представления в «бэровских» пространствах / И. И. Максименко // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 4. – С. 54-64. – EDN YBTKIO.
10. Максименко, И. И. Алгебраическая и топологическая представимость решеток / И. И. Максименко // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2024. – № 2. – С. 44-50. – DOI 10.5281/zenodo.12548507. – EDN RRMOKS.
11. Третьяков, И. А. Функции сложности для выделения и распознавания характерных участков экспериментальных кривых / И. А. Третьяков, В. В. Данилов // Вестник Донецкого национального университета. Серия А: Естественные науки. – 2017. – № 2. – С. 101-107. – EDN YMDWPZ.
12. Третьяков, И. А. Рекомендации по выбору критериев оптимальности и эквивалентности скрытых марковских моделей для АСНН радиосигналов / И. А. Третьяков // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 4. – С. 41-45. – EDN UWZMCR.

Поступила в редакцию 28.03.2025 г., рекомендована к печати 14.04.2025 г.

REPRESENTABILITY OF MEALY AUTOMATIC CLASSES IN TERMS OF BAER AND P-ADIC METRICS

Maksimenko I.I.

In this paper, we consider control experiments in potentially infinite classes of synchronous, asynchronous, and generalized Mealy automata. We formulate the criteria for the existence of such experiments in terms of limit sets of a special "Baer" metric space. It is shown that similar criteria are also satisfied for p-adic metrics, which confirms the "adelic" democracy of control experiments.

Keywords: synchronous, asynchronous, Mealy automaton, limit set, Baer metric, p-adic metric.

Максименко Игорь Иванович

кандидат физико-математических наук, доцент
кафедры компьютерных технологий ФГБОУ ВО
«Донецкий государственный университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: igor.maksimenko_1967@mail.ru

Maksimenko Igor Ivanovich

Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor at Department of Computer
Technologies of Donetsk State University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

ПРИМЕНЕНИЕ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА В СИНТАКСИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ

© 2025 *Петрова Н.К., Ситников С.Ю., Хамитов Р.М., Журавлёв П.В.*

Представлены основные принципы синтаксического анализа текста, содержащего запись математического выражения, описаны приёмы выделения арифметических операций и операндов, выполнение выделенных элементов в виде исполняемого кода. Для построения парсера использован объектно-ориентированный подход, который предусматривает создание объектов, представляющих различные части арифметического выражения и их взаимодействие для выполнения требуемых операций. Подробно описаны основные этапы построения парсера. Представлен полный набор контрольных примеров, позволяющих понять суть программного продукта. Результаты таких исследований представляют методический интерес при подготовке студентов по направлению «Прикладной искусственный интеллект»: в статье достаточно подробно рассмотрена роль этого вида разработок для задач искусственного интеллекта. Программа написана на языке C++ и функционирует в операционной системе Linux.

Ключевые слова: парсинг, лексема, токен, лексер-токенизатор, методы синтаксического анализа, синтаксическое дерево, алгоритмы интеллектуальных систем.

Введение. Синтаксический анализ – вид работ по инструментальному исследованию программы, основанный на анализе исходных кодов в режиме, не предусматривающем реального выполнения кода (ГОСТ Р 71207-2024) [1]. Это процесс построения структуры (дерева или графа) из входной последовательности символов, текстов или программного кода на основе определённых формальных грамматик с использованием специализированных инструментальных средств (статических анализаторов).

В контексте алгоритмов интеллектуальных систем синтаксический анализ играет ключевую роль, так как он позволяет системам обрабатывать и интерпретировать текстовую информацию, распознавать её структуру и извлекать значимые данные для дальнейшей обработки. Его значимость в контексте искусственного интеллекта (ИИ) трудно переоценить. Перечислим лишь некоторые примеры использования парсеров в ИИ, демонстрирующих важность понимания парсинга для работы с нейросетевыми моделями, обрабатывающими текстовые данные.

- Обработка естественного языка (NLP): синтаксический анализ используется для построения синтаксических деревьев предложений, что помогает системам понимать структуру текста.

- Компиляторы и интерпретаторы: парсеры являются основой для анализа и выполнения программного кода.

- Экспертные системы: синтаксический анализ помогает интерпретировать правила и запросы, заданные в формализованном виде.

- Системы автоматического обучения: парсинг используется для обработки данных, например, при анализе текстов или структурированных данных.

- Чат-боты и голосовые помощники: синтаксический анализ помогает интерпретировать пользовательские запросы и преобразовывать их в действия.

Таким образом, синтаксический анализ является важным компонентом в обучении прикладному искусственному интеллекту, предоставляя студентам необходимые знания и навыки для работы с различными типами данных и алгоритмов.

Цели исследования и особенности подхода. Цель нашего исследования заключается в разработке методологии применения объектно-ориентированного подхода в синтаксическом анализе с целью создания гибкого и расширяемого парсера, который будет служить обучающим инструментом для студентов в области прикладного искусственного интеллекта, а также углубит их понимание алгоритмов, обработки данных и принципов реализации сложных интеллектуальных систем.

Одним из классических подходов синтаксического анализа является использование контекстно-свободных грамматик, которые можно реализовать с помощью рекурсивного спуска или методов парсинга с помощью стеков. Эти методы позволяют представить выражения и производить их обработку, находя токены и строя синтаксическое дерево [2].

Среди инструментов автоматизации создания синтаксических анализаторов, таких как Flex/Bison [3], ANTLR [4], Boost Spirit [5] и др., проект парсера, основанный на объектно-ориентированном подходе, может занять свою нишу, акцентируя внимание на гибкости и расширяемости. ООП позволяет создавать модульные конструкции, где каждый компонент (лексер, парсер, обработчик ошибок и т. д.) может быть легко модифицирован или расширен. Это обеспечит интеграцию новых функций, таких как поддержка дополнительных операторов, а также улучшит читаемость и поддержку кода.

Наш подход обладает следующими ключевыми отличиями от существующих решений:

Объектно-ориентированный подход: в отличие от традиционных инструментов (Flex/Bison, ANTLR), которые используют генерацию кода на основе грамматик, наш парсер реализован вручную с использованием ООП. Это обеспечивает большую гибкость и модульность, упрощает добавление новых операторов и функций без изменения общей структуры кода.

Интеграция с интеллектуальными системами: наш парсер может быть частью более сложных ИИ-систем (например, NLP, экспертные системы), где требуется интерпретация выражений. Это отличает его от стандартных парсеров, которые часто ограничены задачами компиляции.

Поддержка сложных конструкций: разрешение множественных унарных операций без скобок (как в Python) и обработка переменных делают наш подход более универсальным для образовательных и исследовательских задач.

Методическая направленность: парсер разработан не только как инструмент, но и как обучающий пример для студентов. Он демонстрирует принципы ООП, синтаксического анализа и их применение в интеллектуальных системах, что редко встречается в чисто технических решениях.

Несмотря на появление новых языков для системного программирования, таких как Rust, Go, Ada и др., для решения поставленной задачи нами был выбран классический язык программирования C++, который зарекомендовал себя как надёжный и эффективный инструмент современного разработчика программного обеспечения.

Использование объектно-ориентированного подхода в нашей разработке может продемонстрировать, как принципы ООП применяются при создании интеллектуальных систем, в которых организация данных и взаимодействие объектов имеют первостепенное значение.

При помощи нашего парсера студенты могут изучить, как фрагменты кода, который может стать основой для более сложных систем ИИ, таких как системы, принимающие математические решения, а также понять, как разрабатывать алгоритмы, обеспечивающие эффективный синтаксический анализ – всё это будет способствовать пониманию более сложных ИИ-систем и помогать развивать навыки программирования, алгоритмического мышления и задач, связанных с анализом данных, таких, как построение синтаксических деревьев и создания интерпретаторов.

Разработанный нами парсер может быть использован как часть интеллектуальной системы, например, для обработки пользовательских запросов, интерпретации математических выражений в системах автоматического обучения или в экспертных системах, где требуется анализ и выполнение формализованных выражений.

Конечно, нейросети способны генерировать парсеры, но их применение не отменяет потребности в прозрачных, детерминированных алгоритмах — особенно в образовании и системах с жёсткими требованиями. Наш подход обеспечивает точность, объяснимость и основу для интеграции с ИИ, что подтверждается контрольными примерами и архитектурой на базе ООП.

Таким образом, эта работа имеет не только методическое значение, но также напрямую связана с интеллектуальными системами: парсер является базовым компонентом многих ИИ-систем (NLP, чат-боты, экспертные системы), методы, описанные в статье, лежат в основе более сложных интеллектуальных систем.

Теоретические и методические аспекты, заложенные в разработку парсера.

Программирование с использованием синтаксического анализа включает в себя различные методы и алгоритмы [6]. В представленном в настоящей статье проекте используется для нисходящего анализа метод рекурсивного спуска и метод LL(k).

Для реализации парсера используется объектно-ориентированный подход, который предусматривает создание объектов, представляющих различные части арифметического выражения, включая операторы, операнды, скобки и другие, а также их взаимодействие для выполнения требуемых операций. Основные этапы решения задачи включают следующие далее шаги.

Лексический анализ: преобразование входной строки с выражением в последовательность лексем (токенов), таких как числа, операторы и скобки.

Синтаксический анализ: разбор последовательности лексем с использованием грамматики арифметического выражения и создание дерева разбора.

Создание объектов: на основе дерева разбора создаются объекты, представляющие операторы, операнды и другие элементы арифметического выражения.

Интерпретация выражения: используя созданные объекты, происходит интерпретация выражения, то есть выполнение требуемых математических операций.

Получение результата: после интерпретации выражения вычисленное значение возвращается в качестве результата.

Такой подход позволяет легко добавлять новые операторы или функции в арифметическое выражение, расширяя существующие классы объектов или создавая новые классы. Он также облегчает отладку и тестирование кода, так как каждый объект выполняет свои задачи в изолированной среде.

В области синтаксического анализа сложился свой стиль устойчивых выражений, которые понятны специалистам, но зачастую имеют разный смысл в зависимости от контекста.

Базовыми понятиями в синтаксическом анализе являются:

Лексема – это минимальная единица синтаксического анализа, которая соответствует шаблону токена и идентифицируется лексическим анализатором как экземпляр данного токена. Например, на C++ – это оператор логического сравнения $=$, или оператор инкремента $++$ и т.п.

Токен – объект, который имеет в своем составе идентификатор, какого рода лексему он отражает, а также необязательный атрибут, содержащий дополнительную информацию о значении данного экземпляра.

Лексер (токенизатор) – программа или часть программы, разбирающая исходный текст на последовательность токенов.

Синтаксическое дерево – древовидное представление синтаксической структуры исходного кода, где вершины обозначают операторы, а листья – операторы – переменные и константы.

Для выражения: $(A + B) * 5$ синтаксическое дерево представлено на рис. 1. Такая форма представления записи выражения очень удобна для вычисления его значения с помощью рекурсии.

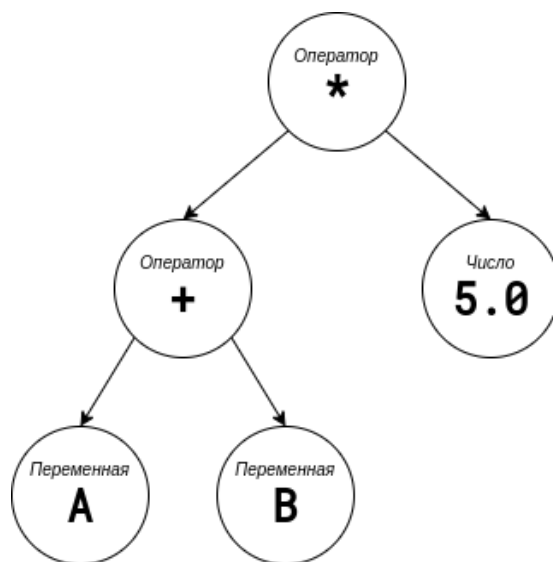


Рис. 1. Пример синтаксического дерева

Расширенная форма Бэкуса – Наура (РБНФ) – формальная система определения синтаксиса, в которой одни синтаксические категории последовательно определяются через другие. Используется для описания контекстно-свободных формальных грамматик [7].

Терминальные символы – это минимальные элементы грамматики, не имеющие собственной грамматической структуры. В РБНФ терминальные символы – это либо предопределённые идентификаторы (имена, считающиеся заданными для данного описания грамматики), либо цепочки – последовательности символов в кавычках или апострофах.

Нетерминальные символы – это элементы грамматики, имеющие собственные имена и структуру. Каждый нетерминальный символ состоит из одного или более терминальных и/или нетерминальных символов, сочетание которых определяется правилами грамматики. В РБНФ каждый нетерминальный символ имеет имя, которое представляет собой строку символов.

Основываясь на описанных выше понятиях, перейдём к разработке алгоритма решения задачи, которая требует сделать из строки символов работающую программу.

Разработка контрольных примеров и алгоритма решения задачи. Для понимания сути разрабатываемого приложения и формирования алгоритма его реализации разработаны контрольные тестовые примеры, позволяющие решить поставленную задачу. Для проверки и понимания задачи составим несколько контрольных примеров, исчерпывающих полноту задачи.

Пример 1. Проверка арифметики, обработка скобок:

$$A = 6 \\ (1 + 3) * (5 - 9) / 10 + A$$

Ответ: 4.4

Пример 2. Все вариации записи чисел

$$10 + 17.1 + .8 + 5. + 1.5e2 + 100e-2 + 14_001$$

Ответ: 14184.9

Для повышения читабельности числа, мы используем знак нижнего подчеркивания для разделения разрядов.

Пример 3. Проверка приоритета операций

$$A = 9 \quad B = 4 \\ (A + B * A) + (B * A + B) + ((A + B) * A)$$

Ответ: 202

Пример 4. Проверка приоритета бинарных операций, с использованием унарных

$$A = 4 \quad B = 8 \quad C = 12 \quad D = 6 \\ A * B + C / B - D * -A + B / -A$$

Это выражение эквивалентно стандартной математической записи

$$A * B + C / B - D * (-A) + B / (-A)$$

Ответ: 55.5

Пример 5. Деление на ноль

$$1234 / 0$$

Ответ: NaN (не число)

Анализ контрольных примеров позволяет перейти к разработке алгоритма решения. Мы будем использовать следующие три элемента: лексер (преобразование потока символов в поток токенов), парсер (преобразование потока символов в синтаксическое дерево), интерпретатор (вычисление значения выражения, с данными значениями переменных)

Рассмотрим функции лексера: он может распознавать всего 11 видов токенов, которые в программе реализованы через перечисление enum TokenType:

```
enum TokenType {
    O_BRACKET,      Открывающая круглая скобка
    C_BRACKET,      Закрывающая круглая скобка
    PLUS,           Оператор плюс
    MINUS,          Оператор минус
    MULT,           Оператор умножения
    DIV,            Оператор деления
    VAR,            Переменная
    NUM,            Число
    ASSIGN,         Оператор присваивания
    COMMA,          Запятая
    END,            Конец
};
```

Токены, обозначающие число и переменную, несут в себе дополнительную информацию – числовое значение и имя переменной, соответственно. Переменные начинаются с букв английского алфавита и далее могут содержать буквы английского алфавита, цифры, и нижнее подчеркивание.

Числа же могут начинаться только с цифр. Тем самым, каждый тип токена определяется по первому символу, что значительно облегчает задачу написания лексера. Токен конца возвращается в случае, когда символы в исходном потоке закончились.

Определение классов для операторов, операций и операндов математического выражения. Для реализации лексера разработан класс `Lexer`, который инкапсулирует процесс разбиения строки на поток токенов. Этот класс имеет 3 поля: ссылку на исходную строку (`str`), константный итератор по исходной строке (`it`), текущий токен. При этом, публичным (открытым) является только атрибут `str`.

Публичные методы:

- конструктор из строки
- `next()` – считывает из исходной строки следующий токен и возвращает его
- `current()` – возвращает текущий токен. Если ни один токен еще не был обнаружен, то метод начинает сканировать строку в поисках первого токена (вызывает внутри себя метод `next()`)

Лексер анализирует строку «лениво», не храня историю выявленных токенов.

Метод `next()` делегирует распознавание токена методу `scanToken`, который, в свою очередь вызывает `scan`-функции (`scanNum`, `scanVar`, `scanOp`), пока одна из них не сможет распознать токен.

`Scan`-функции принимают итератор по строке. Начальная позиция итератора указывает на первый символ предполагаемого токена. Функция передвигает итератор до тех пор, пока не встретит символ, который нельзя отнести к сканируемому токenu. Подобные функции возвращают либо «пустое» значение, указывающее, что токен не был распознан, либо пару значений – тип токена (`тег`) и его дополнительный атрибут, в контексте нашей программы это называется `RawToken`.

Получив `RawToken`, метод `next()` рассчитывает на сколько изменилась позиция итератора, и создает объект `Token`, который хранит еще начальную и конечную позиции токена.

Рассмотрим функции парсера. Для этого представим краткое описание ещё некоторых грамматических, с точки зрения программы, понятий, чтобы изложить суть работы этого объекта. Существуют большое число алгоритмов для синтаксического анализа контекстно-независимых грамматик. Одним из самых простых для реализации вручную является метод рекурсивного спуска [7], поскольку он реализуется путем взаимного вызова процедур, где каждая процедура соответствует одному из правил контекстно-свободной грамматики. К тому же, такой парсер работает за линейное время. Однако, для него необходима подходящая «грамматика», которая позволяет по очередному токenu однозначно выбрать один из альтернативных вариантов раскрытия каждого нетерминала. Для реализации этой задачи мы используем метод `LL(k)`. Он означает: `LL` «слева направо, слева выводимый» (`Left-to-Right, Leftmost derivation`), то есть при синтаксическом разборе мы строим левостороннюю производную, раскрывая символы слева направо. Метод `LL(k)` описывает, насколько символов (`k`) вперед анализатор должен смотреть, чтобы принять решение о правиле разбора. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

Все операторы в рассматриваемом случае «левоассоциативны». Это означает, что выражение $A / B / C$ будет эквивалентно $(A / B) / C$ и иметь синтаксическое дерево, показанное на рис. 2.

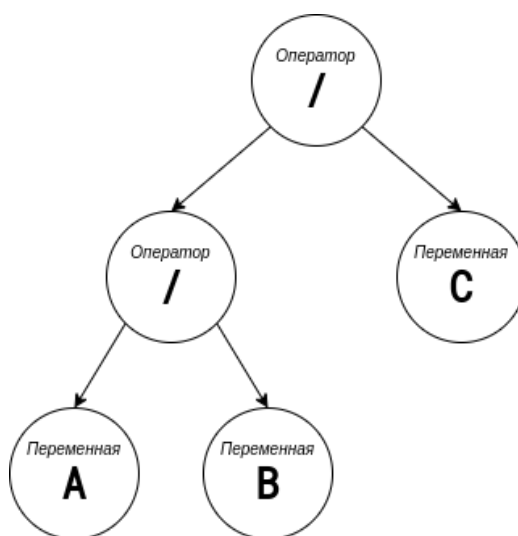


Рис. 2. Ассоциативность операций

Единая ассоциативность операторов упрощает задачу парсингу. Грамматику для арифметических выражений можно записать так:

```

expr := expr '+' expr | expr '-' expr
      | expr '*' expr | expr '/' expr
      | '+' expr      | '-' expr
      | '(' expr ')'   | NUM | VAR
  
```

где NUM обозначает терминал для числа, а VAR терминал переменной.

Однако, такая грамматика не позволяет определять порядок операций. Специализированные инструменты по генерации парсеров позволяют определять приоритет операторов, расширяя возможности РБНФ, что облегчает написание грамматики. В данном случае можно добиться желаемого результата, введя новые нетерминалы:

```

operand := NUM | VAR | '(' expr ')'
          | '+' operand | '-' operand
expr    := expr '+' term | expr '-' term | term
term    := term '*' operand | term '/' operand | operand
  
```

Теперь операции умножения и деления не могут быть «разорваны» сложением и вычитанием и будут всегда находиться внизу синтаксического дерева.

Следует также ещё раз отметить, что указанная грамматика леворекурсивна и, поскольку определение нетерминала `expr` начинается с самого же `expr`, а нисходящий алгоритм синтаксического анализа не способен обрабатывать леворекурсивные грамматики, поэтому он войдет в бесконечную рекурсию. По этой причине необходимо модифицировать вводимый язык еще раз:

```

operand := NUM | VAR | '(' expr ')'
          | '+' operand | '-' operand
term    := operand termTail
termTail := '*' operand termTail
          | '/' operand termTail
          | ε
expr    := term exprTail
exprTail := '+' term exprTail | '-' term exprTail | ε
  
```

Под символом ϵ понимается пустая строка.

Следствием определения грамматики, которая выбрана вначале и модифицирована в дальнейшем, является то, что допустимы такие выражения, когда унарные операции могут записывать в подряд и не требовать скобок (пример 6).

Пример 6. Применение унарных операций без скобок

$$A = 15 \quad B = 7 \quad C = 9$$

$$+B * ++A - +5 - +A + -6.7 - --C + -+-B + -+12$$

Эта выражение эквивалентно стандартной записи математическому выражения на C++:

$$B * ++A - 5 - A - 6.7 - --C + B - 12$$

Ответ: 71.3

Пришлось отказаться от добавления дополнительных ограничений в грамматику из-за отсутствия практического смысла на запрет таких конструкций. К тому же, аналогичные выражения допустимы, например, и в языке Python, однако не допустимы в таких языках как VBA [8].

На основе введённых грамматических ограничений покажем, что представляет из себя класс Parser, который инкапсулирует в себе процесс синтаксического анализа. Этот класс имеет единственный поле lexer, содержащее экземпляр класса Lexer. Методы класса не обращаются напрямую к полю lexer, а используют перечисленные далее методы-помощники:

check(tag) – проверяет, что текущий токен имеет нужный тег и возвращает логическое значение;

isMatch(tag) – проверяет, что текущий токен имеет нужный тег и возвращает логическое значение. Если условия соблюдены, то передвигает позицию лексера на следующий токен;

match(tag) – проверяет, что текущий токен имеет нужный тег, в случае неудачи создает исключение, сообщаящее об ошибке, при истинности условия, лексер переходит к следующему токenu.

Все остальные методы делятся на два типа: extract-методы и parse-методы. Из всех перечисленных выше, только parse-методы вместе с конструктором являются публичными.

Extract-методы извлекают из потока токенов нужный нетерминал (extractExpr, extractExprTail, extractOperand), возвращая один из соответствующих узлов синтаксического дерева. Логика внутри этих методов практически полностью повторяет описание введённой грамматики, что и требовалось получить, занимаясь ее преобразованием.

Важной особенностью, на которую следует обратить внимание, является то, что нетерминал expr не требует, чтобы выявленное выражение заканчивалось концом строки (что невозможно, потому что expr может быть, например, внутри скобок). Поэтому попытка обработать, к примеру, выражение (1) не выявит вопросов с входными данными, а в синтаксическое дерево вставится первая скобка. Именно по этой причине эти методы скрыты, и для парсинга используются специальные parse-методы, которые проверяют, что после извлечения необходимой информации в строке не осталось дополнительных токенов:

$$(5 + 6) (7 + 8) \tag{1}$$

Существует всего два parse-метода – parse и parseVarMap. Первый анализирует выражение, значение которого нужно вычислить, и возвращает корень синтаксического дерева. Второй – обрабатывает область присваивания переменных и наполняет хеш-карту вычисленными значениями переменных.

Рассмотрим функции Интерпретатора. Интерпретатор, как отдельный модуль, в исходном коде не присутствует, являясь одним целым с описанием классов для представления синтаксического дерева. Все узлы дерева являются наследниками абстрактного класса `Node`, имеющего один виртуальный метод `eval`, который принимает хэш-таблицу со значением переменных.

Если узел содержит потомков, то при вызове `eval`, он будет передавать входную хэш-таблицу своим потомкам, komponуя их результаты. То есть, для вычисления значения выражения достаточно вызвать метод `eval` у корневого узла дерева.

Иерархию классов для репрезентации узлов синтаксического дерева можно изобразить так:

- `Node`
- `UnNode`
- `UnMinusNode`
- `UnPlusNode`
- `BinNode`
- `BinDivNode`
- `BinMinusNode`
- `BinPlusNode`
- `BinMultNode`
- `VarNode`
- `NumNode`

Все методы и атрибуты перечисленных классов являются публичными.

`UnNode` – абстрактный класс для представления унарных операций. Хранит внутри себя одну ссылку на экземпляр `Node` с именем `sub`. Все наследники переопределяют только метод `eval`.

`BinNode` – абстрактный класс для бинарных операций. Хранит ссылки на два экземпляра типа `Node` – `left` и `right`. Все наследники переопределяют только метод `eval`.

`NumNode` отражает числовую константу и содержит один атрибут `num` типа `double`, который возвращается при вызове `eval`.

`VarNode` отражает переменную и содержит ее строковое имя. При вызове `eval`, находит значение переменной в хэш-таблице и возвращает его.

Разработка пользовательского интерфейса и тестирование программы. К программному интерфейсу программы был добавлен интерфейс командной строки, который реализован описанным далее образом.

- Первый аргумент, обязательный, содержит выражение, значение которого нужно вычислить, второй аргумент, опциональный, содержит объявления переменных. Каждое объявление состоит из имени переменной, знака ``='`` и выражения. Выражение может ссылаться на уже объявленные переменные.

- Каждое объявление разделяется пробелом или запятой.

- Результат вычислений помещается в стандартный поток вывода (`stdout`).

- При обнаружении синтаксической ошибки программа завершится с кодом 1 и в стандартный поток вывода отобразится сообщение о типе ошибке и ее месте во входных данных.

Работу консольного интерфейса можно продемонстрировать при тестировании разработанной программы по представленным выше контрольным примерам. Через аргументы командной строки указывались исходное выражение и значение переменных, а программа выводила результат вычислений.

Примеры работы консольного интерфейса при тестировании проекта:

Контрольный пример №1

```
> ./curse '(1 + 3) * (5 - 9) / 10 + A' 'A = 6'
4.4000
```

Контрольный пример №2

```
> ./curse '10 + 17.1 + .8 + 5. + 1.5e2 + 100e-2 + 14_001'
14184.9000
```

Контрольный пример №3

```
> ./curse '(A + B * A) + (B * A + B) + ( (A + B) * A)' 'A = 9 B = 4'
202.0000
```

Контрольный пример №4

```
> ./curse '1234 / 0'
nan
```

Выше (пример 6) было отмечено, что следствием выбранной грамматики является тот факт, что допустимо писать несколько унарных операций в подряд, не обрамляя их скобками. Для дополнительной проверки корректности программы убедимся в правильности вычисления указанного выражения.

```
> ./curse '+B * ++A - +5 - +A + -6.7 - -- C + -+-B + -+12' 'A = 15 B = 7 C = 9'
71.3000
```

Чтобы проверка удовлетворяла свойству массовости необходимо провести дополнительные расчеты, чтобы убедиться в работоспособности алгоритма при любых вариантах корректно заданных арифметических выражений:

Дополнительный пример №1

```
> ./curse '(38140 - 1 + J * Gr / (-250.2343 - J) / 41 - 0.2 + (7)) * (Gr)' 'J = 0.553 Gr = 38'
1449540.3223
```

Дополнительный пример №2

```
> ./curse '(a / 234.12 - 34) * b / 45 + (a + c) - b * 8' 'a=6 b=a+6 c=13-b'
-98.0598
```

Дополнительный пример №3

```
> ./curse 's1 * s5' 's1=2 s2=4 s3=76-s1 s4=-s2*7/5 s5=s2 - s3 / s1'
-66.0000
```

Дополнительный пример №4

```
> ./curse '13.345 - 153.423 * 7 - ((gamma+8) - beta/(5*gamma))' 'gamma=86 beta=64'
-1154.4672
```

Результаты всех рассмотренных случаев совпали с независимыми расчётами, что свидетельствует о корректности и полноте разработанного алгоритма.

Выводы. В данной работе были обозначены ключевые аспекты синтаксического анализа (парсинга), служащие основой для реализации программы, которая трансформирует символьные строки с арифметическими выражениями в команды, выполняемые процессором. Разработанный программный продукт способен вычислять значения выражений, содержащих неограниченное количество переменных, что подчеркивает его гибкость и функциональность.

Контрольные примеры, включенные в исследование, не только наглядно демонстрируют работу алгоритма, но и служат убедительным доказательством его корректности и полноты. Задачи, решаемые в рамках данной работы, подчеркивают важность объектно-ориентированного подхода, который способствует созданию трех ключевых объектов для построения синтаксического дерева, обеспечивая инкапсуляцию всех внутренних операций. Это, в свою очередь, создает удобный интерфейс для пользователей и разработчиков.

Объектно-ориентированное программирование (ООП) усиливает модульность и расширяемость системы, что позволяет легко добавлять новые операторы и операнды, а также производить их модификацию и комбинирование. Каждая составляющая выражения представлена отдельным классом с четко определённым поведением, что значительно упрощает процесс дальнейшей работы с алгоритмом.

Перспективы использования разработанного алгоритма выходят за рамки простого парсинга арифметических выражений. Он может стать основой для создания компиляторов и интерпретаторов для различных языков программирования, а также для разработки программных инструментов, обеспечивающих обработку и анализ арифметических выражений в таких областях, как автоматическое вычисление формул в электронных таблицах и создание математического ПО.

Разработанный нами парсер отличается от существующих инструментов (например, ANTLR) своей образовательной компонентой и гибкостью для задач ИИ. Предлагаемый подход демонстрирует принципы ООП на реальном примере, что важно для подготовки специалистов в области ИИ, где модульность и расширяемость критичны. Кроме того, перспективным направлением мы видим комбинацию нашего метода с нейросетевыми оптимизациями. Метод сохраняет актуальность как эталон для валидации нейросетевых решений.

Будущее развитие проекта предполагает возможность внедрения предобученных нейросетевых моделей, которые могли бы предсказать структуру выражений, что ускорит процесс построения синтаксического дерева. Применение методов объяснимого ИИ (XAI, от английского "Explainable Artificial Intelligence") также представляется актуальным, поскольку визуализация процесса принятия решений парсером имеет важное значение для образовательных целей и усовершенствования представленных технологий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ Р 71207-2024. Защита информации. Разработка безопасного программного обеспечения. Статический анализ программного обеспечения. Общие требования: национальный стандарт Российской Федерации: введен 2024-04-01. – М.: Стандартинформ, 2024 – 24 с.
2. Ахоб, А. Теория синтаксического анализа, перевода и компиляции. Синтаксический анализ: Том 1 / А. Ахоб, Дж. Ульман. – М.: Книга по Требованию, 2012. – 613 с.
3. Levine, J. R. Flex & Bison: Text Processing Tools / J. R. Levine. – O'Reilly Media, 2015. – 400 p.
4. Parr, T. The Definitive ANTLR 4 Reference. / T. Parr. – Pragmatic Bookshelf, 2013. – 384 p.
5. Schaling, B. The Boost C++ Libraries. / B. Schaling. – O'Reilly Media, 2011. – 240 p.
6. Dick Grune, Criel Jacobs. «Parsing Techniques: A Practical Guide» [Электронный ресурс]. – URL: http://www.worldcolleges.info/sites/default/files/ParsingTechs_A_Practical_Guide.pdf (дата обращения 11.02.2024).
7. Scowen, R. S. Extended BNF – A generic base standard. / R. S. Scowen // Software Engineering Standards Symposium – 1993. – 11 p.
8. Петрова, Н. К. Преподавание Visual Basic for Applications как базового языка для студентов технического вуза / Н. К. Петрова, С. Ю. Ситников, Р. М. Хамитов // Компетентность. – 2021. – № 9-10. – С. 14-21. – DOI 10.24412/1993-8780-2021-9-14-21. – EDN WKPMUM.

Поступила в редакцию 31.03.2025 г., рекомендована к печати 14.04.2025 г.

AN OBJECT-ORIENTED APPROACH TO SYNTACTIC ANALYSIS: METHODOLOGICAL ASPECTS FOR TRAINING SPECIALISTS IN INTELLIGENT SYSTEMS

Petrova N.K., Sitnikov S.IU., KHamitov R.M., ZHuravlev P.V.

The basic principles of syntactic analysis of a text containing a record of a mathematical expression are presented, techniques for selecting arithmetic operations and operands, and the execution of selected elements in the form of executable code are described. To build the parser, an object-oriented approach was used, which provides for the creation of objects representing various parts of an arithmetic expression and their interaction to perform the required operations. The main stages of building a parser are described in detail. A complete set of control examples is presented to help you understand the essence of the software product. The results of such studies are of methodological interest in the preparation of students in the field of "Applied artificial intelligence": the article discusses in sufficient detail the role of this type of development for the tasks of artificial intelligence. The program is written in C++ and operates in the Linux operating system.

Keywords: parsing, lexeme, token, lexer-tokenizer, methods of syntactic analysis, syntax tree, algorithms of intelligent systems.

Петрова Наталья Константиновна

кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры информационных технологий и интеллектуальных систем ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», Российская Федерация, Республика Татарстан, г. Казань.
E-mail: nk_petrova@mail.ru

Petrova Natalia Konstantinovna

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of Information Technology and Intelligent Systems of Kazan State Power Engineering University, Russian Federation, Republic of Tatarstan, Kazan.

Ситников Сергей Юрьевич

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных технологий и интеллектуальных систем ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», Российская Федерация, Республика Татарстан, г. Казань.
E-mail: ssitnikov@mail.ru

Sitnikov Sergei IUrevich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of Information Technology and Intelligent Systems of Kazan State Power Engineering University, Russian Federation, Republic of Tatarstan, Kazan.

Хамитов Ренат Минзашарифович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных технологий и интеллектуальных систем ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», Российская Федерация, Республика Татарстан, г. Казань.
E-mail: hamitov@gmail.com

KHamitov Renat Minzasharifovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of Information Technology and Intelligent Systems of Kazan State Power Engineering University, Russian Federation, Republic of Tatarstan, Kazan.

Журавлёв Павел Викторович

магистрант кафедры информационных технологий и интеллектуальных систем ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», Российская Федерация, Республика Татарстан, г. Казань.
E-mail: p917910@gmail.com

ZHuravlev Pavel Viktorovich

Master student at Department of Information Technology and Intelligent Systems of Kazan State Power Engineering University, Russian Federation, Republic of Tatarstan, Kazan.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВИЗУАЛЬНОГО КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ГРАФОВ ПЕРЕХОДОВ

© 2025 Бездетный Н.А., Зори С.А.

В статье предложен новый подход к визуализации графов состояний на основе табличного представления, повышающий наглядность диаграмм за счёт минимизации пересечений рёбер. Описаны теоретические основы метода, алгоритмы преобразования, а также реализованные интерактивные возможности. Приведена оценка сложности алгоритма и показана конкурентоспособность метода по сравнению с классическими алгоритмами компоновки графов.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, визуализация графов, граф состояний, динамические графы, сворачивание графа, интерактивность.

Введение. Современные системы визуального компьютерного моделирования требуют эффективных инструментов для представления сложных структур данных, особенно в контексте графового представления информации. Одной из ключевых проблем является обеспечение оптимального визуального отображения графов переходов (графов состояний), что критически важно для анализа систем с конечным числом состояний. Как показывают исследования, матричная форма представления связей хотя и удобна для хранения и вычислений, значительно уступает наглядности графических схем при восприятии человеком (рис. 1 и 2) [1]. Пользователю сложно проследживать пути переходов, глядя только на матрицу смежности, особенно при большом количестве состояний. Таким образом, возникает необходимость в методах визуализации, которые совмещают строгую структуру матрицы и интуитивную понятность графической диаграммы.

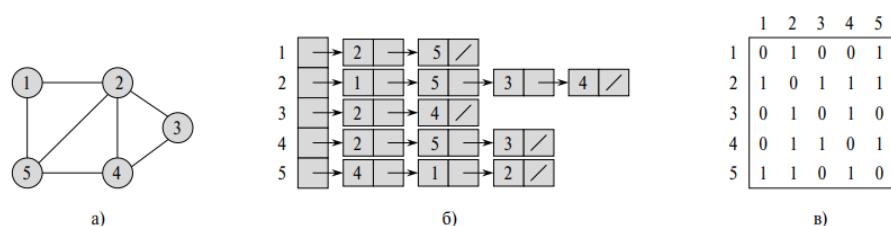


Рис. 1. Различные представления неориентированного графа

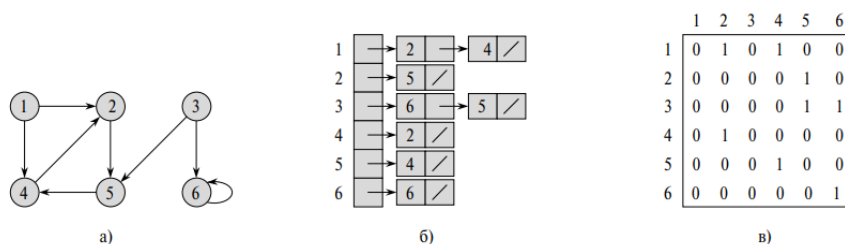


Рис. 2. Различные представления ориентированного графа

Теоретической основой предлагаемого подхода является представление графа переходов с помощью матрицы смежности. Рассмотрим ориентированный граф $G = (V, E)$, где V — множество вершин (состояний системы), а E — множество дуг (направленных переходов между состояниями). Матрица смежности M размером $n \times n$ ($n = |V|$) определяется следующим образом [2]:

- $M[i, j] = 1$, если существует переход из состояния i в состояние j ;
- $M[i, j] = 0$, в противном случае.

Такое представление компактно с точки зрения хранения данных, однако не обеспечивает наглядного визуального образа для пользователя [3]. В связи с этим предлагается метод трансформации матрицы смежности в табличную структуру, которая затем преобразуется в визуальное представление графа (рис. 3). Этот метод призван объединить формальность матрицы с наглядностью диаграммы переходов.

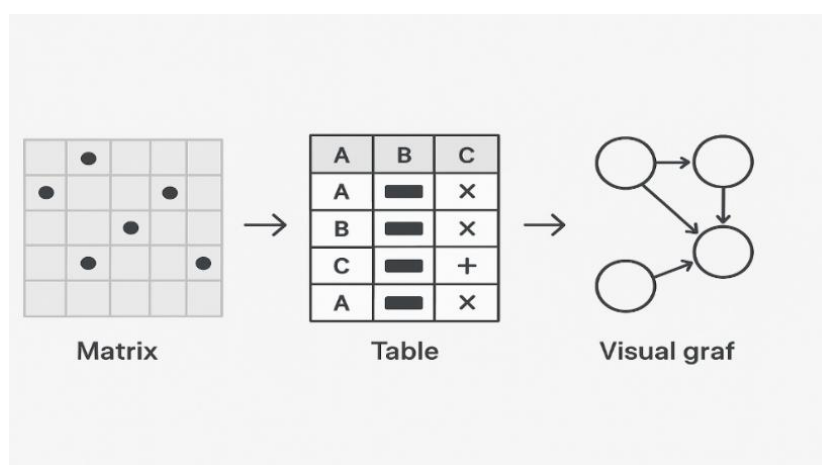


Рис. 3. Метод трансформации

Формальное определение модели. Рассмотрим формальное описание модели системы в виде ориентированного графа:

$$G = (V, E),$$

где $V = v_1, v_2, \dots, v_n$ — множество вершин (узлов), каждая из которых соответствует определённому состоянию системы;

$E = v_i \times v_j$ — множество рёбер (дуг), представляющих направленные переходы между состояниями.

Для построения модели используется специальное табличное представление узлов и переходов между ними. Структура имеет дополнительные свойства для упрощения расчетов, которые можно опустить для формализации модели, поэтому её можно привести к матрице смежности M , которое определяется следующим образом:

$$M = [m_{ij}]; i, j = \overline{1, n}.$$

Элементы матрицы задаются по правилу:

$$m_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если существует переход } v_i \rightarrow v_j, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Также можно сказать, что каждому узлу сопоставлены координаты в двумерном пространстве, а первоначальное состояние диаграммы переходов формируется через узлы v_i располагающиеся по диагонали матрицы M , занимая позиции m_{ij} :

$$pos(v_i) = (x_i, y_i), \text{ причём изначально } x_i = i, y_i = i.$$

После первоначального размещения узлов по диагонали матрицы выполняется дополнительная оптимизация расположения для минимизации пересечений стрелок и улучшения читабельности диаграммы.

Пусть $S \subseteq V$ подмножество узлов, которые могут быть свёрнуты для упрощения диаграммы. Тогда можно описать функцию сворачивания по определенным правилам:

$$move(v_i) = \begin{cases} 1, \text{ если } x_i > 0 \wedge (\neg vertical(x_i - 1, y_i)) \wedge (\neg inTop(v_i)) \\ 0, \text{ иначе} \end{cases},$$

где: $vertical(x, y) = 1$, если в ячейке имеется вертикальная линия;

$inTop(v_i) = 1$, если у узла v_i есть входящее соединение сверху.

Если $move(v_i) = 1$, то новая координата узла:

$$pos(v_i) = (x_i - \Delta x, y_i), \Delta x = 1.$$

Процесс сдвига повторяется до тех пор, пока нет возможности сдвига. После смещения узла происходит пересчёт позиций и связей агрегированного узла – каждое ребро графа $(v_s, v_t) \in E$, соединяющее исходную вершину v_s с конечной v_t , пересчитывает свою координату, что формально можно выразить так:

$$E' = \{(pos(v_s), pos(v_t)) \mid (v_s, v_t) \in E\},$$

где $pos(v_s)$ и $pos(v_t)$ — обновлённые координаты начального и конечного узлов ребра.

Таким образом, после выполнения операции агрегации исходный граф G преобразуется в новый граф G' , описываемый как:

$$G' = (V, E').$$

Оптимизационная задача, неявно лежащая в основе данного метода, направлена на минимизацию визуального шума путём минимизации количества пересечений между узлами и свертки графа в более компактную структуру. Формально записывается следующим образом:

$$\sum_{v_i, v_j \in V, i \neq j} intersections(v_i, v_j) \rightarrow \min,$$

где $intersections(v_i, v_j)$ – функция определяет количество пересечений рёбер между кластерами v_i и v_j .

После оптимизации диаграммы переходов, путём сворачивания узлов, полученная структура используется для генерации геометрии маршрутов переходов. Геометрия каждого перехода $v_i \rightarrow v_j$ определяется как маршрут P_{ij} , состоящий из набора сегментов:

$$P_{ij} = \{s_1, s_2, \dots, s_m\},$$

где каждый сегмент s_m может быть горизонтальным, вертикальным или диагональным.

Маршрут формируется на основе координат узлов v_i, v_j , полученных из уже оптимизированной табличной структуры данных и атрибутов узлов (a_i, a_j) , задающих направление входа и выхода стрелок. Атрибуты формализуются следующим образом:

$$(a_i, a_j) \in \{isOutRight, isInTop, isDiagonalLeftTopIn, \dots\}.$$

Интерактивные возможности (выделение элементов, подсветка связей, динамическое обновление) описываются через специальные функции, которые определяют мгновенные изменения в представлении графа G :

$$Highlight(v_i) \rightarrow E_{highlighted}(v_i), Update(G') \rightarrow G_{updated},$$

где $E_{highlighted} \subseteq E$ представляет собой множество выделяемых (подсвеченных) связей, а G' — это новая конфигурация графа после его динамического обновления.

Таким образом, предложенная модель и алгоритмы её реализации предоставляют математический аппарат для эффективного решения задач визуализации, минимизации пересечений, оптимального распределения узлов и интерактивного взаимодействия с графом состояний.

Предлагаемый метод визуализации. Ключевая идея предлагаемого метода заключается в преобразовании матрицы смежности в специальную табличную структуру, которая служит основой для построения диаграммы состояний и переходов. Изначальное табличное представление располагает узлы (состояния) вдоль диагонали таблицы, а переходы между состояниями отображаются в виде путей (стрелок), соединяющих соответствующие ячейки таблицы. После первоначальной расстановки – визуальное представление преобразовывается и сворачивается по разработанному алгоритму, стремящемуся к минимизации пересечений. Такая структура сочетает свойства матрицы (явное хранение всех связей в виде таблицы) и графовой схемы (визуальные соединения между элементами), обеспечивая наглядность при сохранении строгой структуры данных.

Разработанный алгоритм, последовательно формирующий табличную модель переходов, состоит из четырёх основных этапов:

1. Заполнение узлов и «углов» таблицы. Все состояния размещаются на главной диагонали таблицы (каждая диагональная ячейка соответствует узлу графа). Если между состояниями i и j существует переход в исходном графе, в таблицу добавляется специальная отметка типа «угол» в позицию $[i, j]$, указывающая на связь между узлом j и i . В зависимости от относительного положения i и j такие переходы помечаются как «правый верхний» или «левый нижний» угол таблицы – это заготовки для будущих диагональных соединений.

2. Прокладка горизонтальных и вертикальных линий. На втором этапе таблица дополняется линиями по строкам и столбцам, отражающими существующие переходы между состояниями. Если в строке i обнаружен переход в столбец j , соответствующая ячейка помечается горизонтальной линией; аналогично, для перехода из j в i помечается вертикальная линия в $[i, j]$. Таким образом выделяются маршруты будущих стрелок вдоль рядов и колонок таблицы.

3. Выделение диагональных связей. Третий этап соединяет пометки “угол” с проложенными линиями: если в смежных ячейках на диагонали обнаружены парные отметки (например, угол указывает на связь между i и $i+1$), то добавляются диагональные сегменты, объединяющие соответствующие горизонтальные и вертикальные линии. Это позволяет отобразить последовательные переходы (например, из состояния i в $i+1$) наклонными стрелками на диаграмме.

4. Финальная оптимизация позиций узлов. На заключительном этапе алгоритм проводит локальную оптимизацию компоновки: некоторые узлы могут быть сдвинуты со своих первоначальных диагональных позиций, если это не нарушит корректность схемы, но уменьшит количество пересечений линий. Эти небольшие смещения и разведения рёбер (по горизонтали, вертикали или диагонали) позволяют сделать финальную диаграмму более читабельной.

После выполнения всех этапов формируется итоговая табличная структура, в которой узлы расположены по диагонали (с учётом возможных смещений), все существующие переходы отмечены соответствующими линиями и угловыми метками, указывающими направления входящих и исходящих связей. Полученная структура служит основой для последующей визуализации графа. Она сохраняет в неявном виде всю информацию о переходах и обеспечивает удобный способ обхода связей при их отрисовке.

Преимущества подхода. Предложенный алгоритм позиционирования узлов и визуализации связей обеспечивает ряд преимуществ по сравнению с традиционными подходами компоновки:

1. Минимизация пересечений рёбер. Значительное число пересечений линий затрудняет чтение диаграммы, поэтому в разработанном методе уделяется особое внимание снижению количества пересечений. Табличное упорядочение и финальная оптимизация направлены на достижение максимально планарного расположения графа.

2. Оптимальное использование пространства. Алгоритм стремится равномерно заполнить доступную область визуализации, благодаря чему полученная диаграмма компактна и удобочитаема даже при большом числе узлов.

3. Ясное отображение направленных переходов. Метод корректно визуализирует все типы связей, включая циклические переходы (петли, переходы из состояния в само себя) и взаимные переходы между двумя состояниями. Специальные метки и соответствующие диагональные соединения позволяют отобразить такие случаи без потери информации.

4. Интерактивность и наглядность. Предусмотрена возможность интерактивного взаимодействия с элементами диаграммы: выделение рёбер, подсветка элементов, динамическое обновление при изменении данных. Это упрощает анализ модели за счёт мгновенного отображения результатов и фокусировки на интересующих фрагментах графа.

Программная реализация. Предложенный метод реализован в виде программного модуля визуализации GraphDiagram, разработанного с использованием современного веб-фреймворка (Vue 3 + TypeScript). Данный модуль интегрирован в прототип системы визуального компьютерного моделирования и динамически строит диаграмму состояний на основе рассчитанной табличной структуры переходов.

Визуализация выполняется средствами SVG в координатной сетке, соотнесённой с ячейками таблицы. Названия состояний размещаются вдоль первой строки и первого столбца (заголовки), формируя привычную для пользователя матрицу переходов с подписями состояний.

Внутри сетки диагональные ячейки помечены графическими элементами узлов (например, кружками), а связи между узлами отображаются стрелками, проведёнными по рассчитанным маршрутам. При этом учитывается направление “выхода” стрелки из узла (например, атрибут *isOutRight* задаёт выход стрелки из правого края узла) и тип соединения (горизонтальное, вертикальное или диагональное).

#	Процесс	Куда переходит		
1	ожидание	4-выгрузка пассажиров ✕	+	✕
2	подача колодок	5-выгрузка багажа ✕	+	✕
3	подача гармошки	2-подача колодок ✕ 4-выгрузка пассажиров ✕	+	✕
4	выгрузка пассажиров	5-выгрузка багажа ✕	+	✕
5	выгрузка багажа	6-уборка самолёта ✕	+	✕
6	уборка самолёта	1-ожидание ✕	+	✕

Рис. 4. Пример табличного определения данных

После построения первоначальной диаграммы компонент позволяет интерактивно работать с моделью. При клике на конкретную стрелку перехода она подсвечивается, что облегчает прослеживание конкретного пути в графе. Кроме того, при добавлении или удалении состояний и связей в модели, табличная структура и соответствующая диаграмма пересчитываются автоматически. Таким образом, обеспечивается актуализация визуализации в реальном времени: после любых изменений компонент перерисовывает граф с сохранением заданной логики минимизации пересечений и других описанных свойств. Такая интерактивность повышает эффективность анализа – пользователь может фокусироваться на отдельных частях графа, получать дополнительную информацию по требованию и видеть результаты своих действий мгновенно.

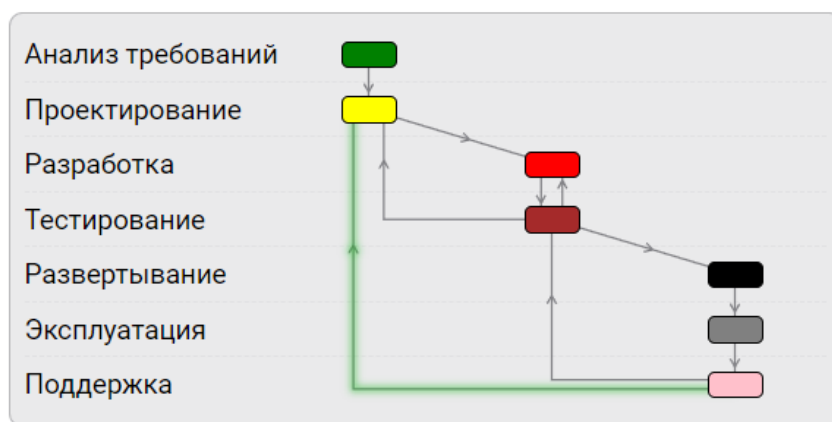


Рис. 5. Визуальное представление графа

Теоретическая оценка эффективности. Для формальной оценки предложенного метода необходимо убедиться, что визуализированная табличная модель эквивалентна исходному графу и улучшает показатели читаемости диаграммы. Прежде всего, сформированная табличная структура однозначно отображает исходный граф: каждой вершине графа соответствует уникальный узел (диагональная ячейка) таблицы, а каждому исходному переходу — уникальный маршрут стрелки на диаграмме. Таким образом, достигается взаимно однозначное соответствие между вершинами и дугами графа и элементами визуальной модели, исключающее потерю информации. Кроме того, топология графа сохраняется – допускаемые перестановки узлов (смена порядка на диагонали) не влияют на набор существующих связей, а лишь оптимизируют их расположение. Все циклические (петли) и двунаправленные переходы корректно отображаются особыми элементами диаграммы, оставаясь изоморфными структурам в исходном графе.

Алгоритмы, реализующие этапы построения таблицы и диаграммы, имеют полиномиальную сложность. Заполнение узлов и базовых связей выполняется за $O(n^2)$ операций (пропорционально размеру матрицы смежности). Наиболее ресурсоёмкие этапы – прокладка линий и оптимизация компоновки – в худшем случае имеют сложность $O(n^3)$. Это связано с перебором пар узлов при попытке уменьшить пересечения. Однако даже кубическая сложность является приемлемой для графов средних размеров: экспериментально подтверждено, что диаграммы с десятками и сотнями состояний генерируются за доли секунды на современном процессоре. Отрисовка геометрических маршрутов стрелок основана на заранее рассчитанной карте расположения узлов и имеет сложность $O(n + e)$ (линейно от числа узлов и связей e). Таким образом, метод пригоден для интерактивной работы с моделями, содержащими до нескольких сотен состояний.

Для оценки качества диаграммы переходов вводятся три ключевых метрики:

1. Число пересечений (I) — количество точек пересечения дуг, не считая узлов. Чем меньше I , тем выше планарность и читаемость. Идеально, если $I = 0$.

2. Плотность графа (ρ) — отношение числа дуг к максимально возможному ($\rho = \frac{|E|}{n(n-1)}$ для ориентированного графа без петель). Высокая плотность затрудняет восприятие из-за большого числа линий.

3. Оценка читаемости (R) — отражает визуальную ясность, зависит от I и ρ . Можно полагать, что часть читаемости обратно пропорциональна числу пересечений и понижается с ростом плотности графа. С другой стороны, можно сказать, что другая часть читаемости снижается при повышении плотности графа.

Таким образом, формально можно ввести две базовые метрики: $R_I = \frac{1}{1+I}$ (при $I = 0$ достигается максимум $R = 1$, а при увеличении числа пересечений R стремится к 0) и $R_\rho = 1 - \rho$. Для того что бы получить комплексную базовую оценку можно совместить данные метрики в одну и ввести коэффициенты:

$$R_{I\rho} = w_1 \frac{1}{1+I} + w_2(1-\rho),$$

где $w_1 + w_2 = 1$, это позволяет придавать каждой составляющей минимизации пересечений и снижению плотности — нужный вес (по стандарту $w_1 = w_2 = 0.5$).

В рамках теоретического сравнения наш метод сопоставлялся с тремя классическими подходами визуализации графов: Force Directed (силовой метод расстановки Fruchterman-Reingold), Hierarchical (иерархическая компоновка по методике Сугиямы) и Tree (Reingold–Tilford – планарное расположение в виде дерева). Используя литературные данные о результатах этих алгоритмов [4–7], был рассчитан средний показатель читаемости для каждого метода (табл. 1).

Таблица 1. Средние метрики для различных алгоритмов

Алгоритм	I	ρ	R_I	R_ρ	$R_{I\rho}$
Разработанная модель	8.86	0.566	0.652	0.434	0.543
Force-Directed (Fruchterman-Reingold)	0.27	0.578	0.787	0.422	0.604
Hierarchical (Sugiyama)	0.74	0.568	0.575	0.432	0.503
Tree (Reingold–Tilford)	0.00	0.559	1.000	0.441	0.720

Для случайных разреженных графов (плотность $\leq 0,5$) предложенный метод обеспечивает среднее значение читаемости около 0,543. Это примерно на 10–15% ниже, чем у Force Directed ($\approx 0,604$), но на 5–10% выше, чем у классического иерархического подхода ($\approx 0,503$). Планарный Tree-метод демонстрирует наиболее высокий показатель ($\sim 0,720$), опережая нашу модель на 25–30%. Однако следует учитывать, что Force Directed и Tree-методы оптимизированы под специфические условия: первый предполагает длительное итеративное вычисление силовых взаимодействий между узлами, а второй применим главным образом к строго древовидным структурам. В нашем случае задача ориентирована на сложные графы с ветвлениями и слияниями, где за основу взят именно иерархический подход. Поэтому наиболее корректным «базовым» конкурентом является метод Hierarchical, и относительно него наша модель показывает улучшение читаемости схемы на указанные 5–10%. Это свидетельствует о конкурентоспособности предложенного метода, где требуется баланс между компактностью и читабельностью диаграммы.

Ограничения и перспективы. Следует отметить ряд ограничений текущего решения. Масштабируемость алгоритма ограничена: при значительном превышении числа состояний (более ~ 200 узлов) время построения табличной структуры начинает заметно возрастать из-за кубической оценки сложности. Кроме того, использование полной $n \times n$ таблицы смежности накладывает ограничения по памяти при больших n (квадратичный рост памяти). Эти проблемы характерны для многих алгоритмов визуализации графов, поскольку задача оптимального размещения узлов с минимизацией пересечений рёбер относится к NP-трудным [8].

Для преодоления обозначенных ограничений планируется исследовать методы повышения производительности. Перспективным направлением является привлечение аппаратного ускорения – например, выполнение наиболее ресурсоёмких вычислений на графическом процессоре. Известно, что GPU способны значительно ускорять алгоритмы компоновки графов за счёт параллельной обработки данных [9]. Реализация вычислений на GPU (например, посредством WebGL в браузерной среде) позволит распараллелить процесс расстановки узлов и отрисовки связей, тем самым повысив интерактивность системы даже для графов большего масштаба.

Ещё одно направление – распределённая визуализация крупных графов: алгоритм может быть адаптирован для разбиения очень большого графа на подсети с параллельной отрисовкой частей и последующим объединением результатов.

Подобный подход в сочетании с облачными технологиями мог бы обеспечить работу с моделями эксабайтного масштаба, распределяя вычислительную нагрузку между узлами кластера.

Также планируется расширение функциональности пользовательского интерфейса: добавление средств поиска по графу, фильтрации отображаемых переходов, интеграции с другими модулями моделирования. Эти возможности сделают инструмент более пригодным для широкого спектра прикладных задач.

Выводы. В работе предложен новый метод визуализации графов переходов, основанный на таблично-структурированном представлении. Разработана модель, преобразующая матрицу смежности в таблицу с размещением узлов по диагонали и специальными отметками для связей, что позволяет строить диаграмму состояний и переходов с сохранением полной информации исходной системы. Формально показано, что полученная табличная диаграмма эквивалентна исходному графу – каждому состоянию соответствует уникальный узел, а каждому переходу – уникальная стрелка, благодаря чему топология системы сохраняется без искажений.

Для практической реализации разработан алгоритмический комплекс из четырёх этапов, обеспечивающих последовательное построение таблицы и графической схемы. Алгоритм имеет полиномиальную вычислительную сложность ($O(n^3)$ в худшем случае), что позволяет эффективно визуализировать модели, содержащие до нескольких сотен состояний, в интерактивном режиме. Реализован программный прототип компонента визуализации (на основе Vue 3 и TypeScript), интегрированный в систему моделирования, который продемонстрировал работоспособность подхода на тестовых примерах.

Теоретическая оценка читаемости диаграмм показала, что предложенный метод не уступает по качеству визуализации распространённым подходам для схожего класса задач. Достигнуто улучшение порядка 5–10% по показателю читаемости по сравнению с классической иерархической раскладкой графа, что подтверждает эффективность выбранной табличной схемы упорядочения узлов. При этом метод значительно превосходит обычное матричное представление по наглядности, приближая диаграмму к планарному виду.

Практическая ценность разработанного решения заключается в возможности его применения для визуализации различных типов графов переходов в прикладных областях – от моделирования бизнес-процессов и рабочих потоков до анализа дискретных автоматов и систем управления. В дальнейшем планируется развивать метод в направлении масштабирования на большие графы и обогащения интерактивных средств анализа, что позволит использовать его в ещё более широком диапазоне задач визуального компьютерного моделирования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Okoe, M. Node-Link or Adjacency Matrices: Old Question, New Insights / M. Okoe, R. Jianu, S. Kobourov // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. – 2019. – V. 25, № 10. – P. 2940-2952. – DOI 10.1109/TVCG.2018.2865940.
2. Алгоритмы: построение и анализ / Т. Х Кормен, Ч. Э. Лейзерсон, Р. Л. Ривест, К. Штайн. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2013. – 1328 с.
3. Ghoniem, M. On the readability of graphs using node-link and matrix-based representations: a controlled experiment and statistical analysis / M. Ghoniem, J.-D. Fekete, P. Castagliola // Information Visualization. – 2005. – V. 4, № 2. – P. 114–135.

4. Shen, Z. Path visualization for adjacency matrices / Z. Shen, K.-L. Ma // Proceedings of the Eurographics / IEEE VGTC Symposium on Visualization (EuroVis'07), Norrköping, Sweden, May 23–25, 2007. – Aire la Ville: Eurographics Association, 2007. – P. 83–90.
5. Dunne, C. Improving graph drawing readability by incorporating readability metrics: a software tool for network analysts / C. Dunne, B. Shneiderman. – College Park, MD: University of Maryland, Human-Computer Interaction Lab, Tech. Rep. HCIL-2009-13, 2009. – 9 p.
6. Mooney, T. The Multi-Dimensional Landscape of Graph Drawing Metrics / T. Mooney, S. Devlin, C. O'Sullivan // IEEE Trans. Vis. Comput. Graph. – 2024. – V. 30, № 1. – P. 1–14.
7. Reingold, E. M. Tidier Drawings of Trees / E. M. Reingold, J. S. Tilford // IEEE Trans. Softw. Eng. – 1981. – V. 7, № 2. – P. 223–228.
8. Purchase, H. C. Graph Layout Aesthetics in UML Diagrams: User Preferences / H. C. Purchase, D. A. Carrington, J.-A. Allder // Journal of Graph Algorithms and Applications. – 2002. – V. 6, №3. – P. 233–254.
9. GPU-accelerated Force Graph [Электронный ресурс]. – URL: <https://github.com/cosmograph-org/cosmos> (дата обращения: 01.04.2025).

Поступила в редакцию 01.04.2025 г., рекомендована к печати 16.04.2025 г.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF VISUAL COMPUTER MODELING BASED ON TRANSITION GRAPH VISUALIZATION

Bezdetnyi N.A., Zori S.A.

The article proposes a new approach to visualizing state graphs based on a tabular representation, which increases the visibility of diagrams by minimizing edge intersections. The theoretical foundations of the method, the transformation algorithms, as well as the implemented interactive features are described. The complexity of the algorithm is estimated and the competitiveness of the method in comparison with classical graph layout algorithms is shown.

Keywords: computer modeling, graph visualization, graph of states, dynamic graphs, graph folding, interactivity.

Бездетный Николай Артёмович

аспирант кафедры программной инженерии им. Л.П. Фельдмана ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: nekooolay@mail.ru

Bezdetnyi Nikolai Artemovich

Postgraduate student at Department of Software Engineering named by L.P. Feldman of Donetsk National Technical University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

Зори Сергей Анатольевич

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой программной инженерии им. Л.П. Фельдмана ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: ik.ivt.rec@mail.ru

Zori Sergei Anatolevich

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Software Engineering named by L.P. Feldman of Donetsk National Technical University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ В БЛОКАХ РАЗДЕЛЕНИЯ НЕФТЕШЛАМОВ ЗА СЧЕТ УСТАНОВКИ УТИЛИЗАЦИОННЫХ СТУПЕНЕЙ

© 2025 Сурикова А.Н., Соловьева Е.В., Старостин А.В.

Предложены мероприятия по повышению эффективности тепловой работы блока разделения нефтешлама (БРНШ), рассмотрен способ утилизации теплоты пара, выходящего из БРНШ, а также увеличения интенсивности выпаривания влаги, ограниченной производительностью вакуумного насоса, предложена схема многоступенчатой выпарной установки по обезвоживанию нефтешлама.

Ключевые слова: БРНШ, нефтешлам, вакуумный насос, нагреватель испаритель, утилизационный теплообменник.

Введение. В Российской Федерации на объектах энергетического комплекса, транспортных, машиностроительных, химических, металлургических предприятий ежегодно образуется более трех млн. тонн нефтяных шламов. Количество мировых нефтяных отходов ежегодно составляет до 10 млрд. тонн. Рециклинг нефтешламов широко распространен и обусловлен экологическими и экономическими причинами, т.к. известно, что они, во-первых являются активными загрязнителями окружающей среды, а, во-вторых, м.б. вторично использованы как ценное углеродное сырье [1].

Если нефтешламы - высокоустойчивые водонефтяные эмульсии (жидкие нефтяные шламы, тяжелая смола пиролиза, смеси нефтяных отходов и т.д., то проблема их утилизации стоит еще более остро, в связи с тем, что их накопление представляют весьма ощутимую экологическую опасность и наносит прямой и косвенный экономический ущерб предприятиям [2].

Рециклинг нефтешламов и использование его вторично как топливо, строительный материал или удобрение, возможен при различных методах утилизации, но изъятие из них углеводородных компонентов возможно только при физическом и термическом методе сушки (обезвоживания), здесь сохраняются без изменений ценные компоненты нефтешламов, такие, как смазочные масла и т.п. Хотя как при физическом, так при термическом методе существуют свои сложности: физические методы разделения нефтешламов либо имеют низкую эффективность разделения, либо требуют значительных капитальных и (или) эксплуатационных затрат, или наносят экологический вред и имеют низкую производительность; термические методы сушки позволяют эффективно производить осушку нефтешлама, являются высоко экологичными, однако требуют значительных расходов энергии из-за большого расхода теплоты испарения воды [3-4].

При методе утилизации нефтешламов в блоках разделения (БРНШ) производится обезвоживание водонефтяных эмульсий «обратного» типа, в которых капельки воды содержатся внутри нефти, с влажностью, обычно, не выше 20...35 %. Испарение влаги из нефтешламов в БРНШ производится под вакуумом в тонких пленках, при этом сохраняются ценные компоненты нефтешламов, имеется возможность обезвоживания высокоустойчивых эмульсий с близкими значениями плотностей фаз.

В нашей стране применяются БРНШ нескольких типов, каждый из которых имеет низкую производительность, высокие удельные расходы теплоты и электроэнергии, и невысокую степень осушки нефтепродуктов (до 0,5...1 % влажности).

В отечественной и зарубежной литературе отсутствуют методики теплового расчета таких установок, но не достаточно полно исследованы закономерности выпаривания влаги из тонких пленок нефтешлама, а также отсутствует описание способов повышения их тепловой эффективности (снижения удельных затрат и повышения степени осушки нефтешлама. Авторы настоящей работы считают проблему повышения производительности БРНШ весьма актуальной и предлагают для этой цели использовать утилизационных ступени [5].

Целью статьи является повышение производительности установки блока разделения нефтешлама при неизменяемом расходе топлива, сжигаемого в водогрейном котле.

Основная часть. Рассмотрим принцип действия установки БРНШ, показанной на рис. 1, которая является аппаратом периодического действия.

Влажный нефтешлам с температурой 20-40°C насосом закачивается в бак выпарного аппарата ВА как правило на 2/3 его объема. Из водогрейного котла ВК греющая вода поступает в горизонтальные трубы нагревателя, температура греющей воды не превышает 95 °С. От наружной поверхности труб нагревателя теплота передается нефтешламу путем свободной конвекции, происходит нагрев нефтешлама до температуры 70...80 °С, при этом начинается процесс выпаривания влаги из нефтешлама.

Выпаривание влаги происходит под вакуумом, создаваемом в баке выпарного аппарата водокольцевым вакуумным насосом (ВН). Нагретый нефтешлам циркуляционным насосом (ЦН) забирается из нижней части выпарного аппарата и подается на полки испарителя. Они располагаются в верхней части аппарата и служат для увеличения массообменной поверхности нефтешлама. При испарении воды на полках испарителя нефтешлам охлаждается на несколько градусов, и стекает обратно в нижнюю часть аппарата. Водяной пар, получаемый в аппарате при испарении воды из нефтешлама, откачивается вакуумным насосом ВН, в котором пар смешивается с охлаждающей водой и конденсируется.

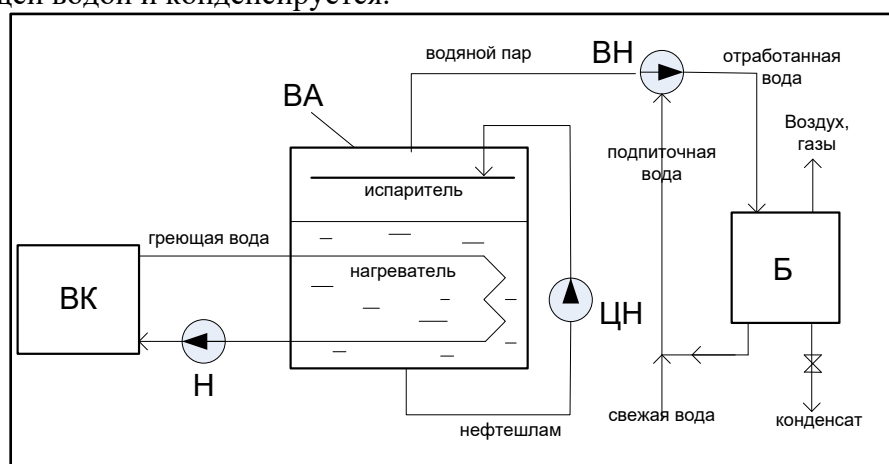


Рис. 1. Интерфейс диалогового окна программы SPECTRA

В результате поверочного теплового расчета аналогичной установки БРНШ-3, (предприятие ООО «Промресурс-Н» г. Череповец Вологодской области), установлено, что данная конструкция имеет следующие недостатки.

Во-первых, в режиме выпаривания тепловая мощность, передаваемая от греющей воды к нефтешламу значительно (в несколько раз) меньше номинальной тепловой мощности водогрейного котла, что связано с недостаточной поверхностью греющих труб и ограниченной объемной производительностью вакуумного насоса, а это обуславливает довольно низкую производительность установки. Во-вторых, теплота пара, образующегося при выпаривании влаги из нефтешлама, никак не используется и теряется в окружающей среде, что обуславливает низкую тепловую экономичность установки, высокий удельный расход теплоты на 1 тонну обезвоженного нефтешлама, а также уменьшает ее потенциальную производительность [6].

Для увеличения интенсивности выпаривания влаги, ограниченной производительностью вакуумного насоса, рассмотрим способ утилизации теплоты пара, выходящего из блока разделения нефтешлама с помощью новой принципиальной тепловой схемы БРНШ с двумя утилизационными теплообменниками.

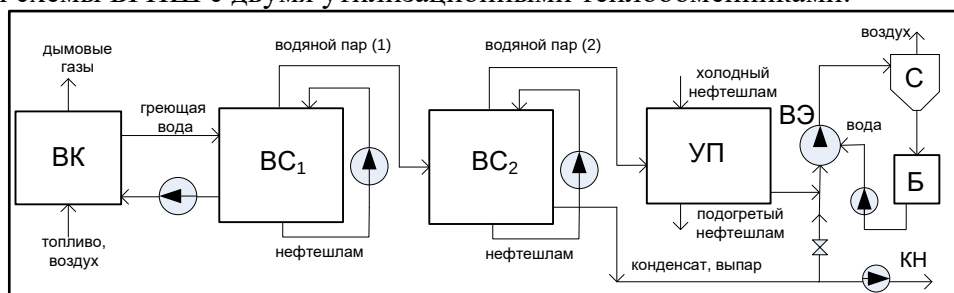


Рис. 2. Тепловая схема установки БРНШ с утилизационными теплообменниками

Такая установка (рис. 2) состоит из следующих основных элементов: ВК – водогрейный котел; ВС₁ – основная выпарная ступень, обогреваемая водой из котла; ВС₂ – утилизационная выпарная ступень, обогреваемая паром, выходящим из основной выпарной ступени; УП – утилизационный подогреватель нефтешлама; ВЭ – водоструйный эжектор (вакуумный насос); КН – конденсатный насос; С – сепаратор; Б – бак для сбора воды. Установка включает также циркуляционные насосы для воды и нефтешлама, линии греющей и охлаждающей воды, пара и конденсата. Утилизационные ступени ВС₂ и УП, кроме своей основной функции, играют роль конденсаторов для пара, образующихся в предыдущих ступенях, и создают в них необходимое разрежение. В результате отпадает необходимость в установке энергозатратного водокольцевого насоса, вместо которого за последней утилизационной ступенью УП достаточно установить водоструйный эжектор ВЭ малой производительности, который будет удалять неконденсирующиеся газы из парового пространства всех ступеней.

Данная установка БРНШ работает периодически следующим образом:

1) В основную и утилизационную выпарные ступени ВС₁ и ВС₂ загружается предварительно нагретый нефтешлам, примерно одинакового объема в каждую ступень (предварительный нагрев нефтешлама необходим для того, чтобы режим выпаривания в основной ступени наступал как можно быстрее, т.к. если основная ступень ВС₁ работает в режиме разогрева холодного нефтешлама, и пар из нее не выходит, то утилизационные подогреватели (ВС₂ и УП) в этот период не будут работать из-за отсутствия греющего пара).

2) После запуска установки в основной выпарной ступени ВС₁ начинается процесс выпаривания влаги из нефтешлама; выходящий из нее первичный пар направляется для обогрева утилизационной выпарной ступени ВС₂, где конденсируется внутри греющих труб.

Теплота конденсации этого пара расходуется на испарение влаги в данной утилизационной ступени и на покрытие тепловых потерь. Вторичный пар, выходящий из утилизационной ступени BC_2 , направляется для обогрева утилизационного подогревателя УП, где за счет своей теплоты конденсации предварительно подогревает холодный нефтешлам для следующего цикла работы обоих выпарных ступеней;

3) Конденсат греющего пара, выходящий из утилизационной ступени и подогревателя, откачивается конденсатным насосом КН, а неконденсирующиеся газы удаляются в атмосферу водяным эжектором ВЭ. Предполагается, что каждая утилизационная ступень может иметь свой конденсатный насос и свой эжектор, потребляющие незначительную мощность, также возможно применение одного конденсатного насоса КН и водяного эжектора ВЭ для обеих утилизационных ступеней, см. рис. 2.

Отметим, что при работающих циркуляционных насосах ЦН, перекачивающих нефтешлам, процесс выпаривания влаги из нефтешлама в основной ступени BC_1 начнется, когда температура нефтешлама в ней превысит температуру нефтешлама в утилизационной ступени BC_2 , а в этой ступени процесс выпаривания начнется, когда температура нефтешлама в ней превысит температуру нефтешлама в утилизационном подогревателе УП. Постепенно установка выйдет на установившийся режим работы.

Поверхность нагрева утилизационной выпарной ступени установки предлагается выполнять в виде горизонтальных труб (с небольшим уклоном для стекания конденсата), внутри которых конденсируется греющий пар, а снаружи за счет свободной конвекции нагревается нефтешлам. Принципиальная схема утилизационной выпарной ступени показана на рис. 3.

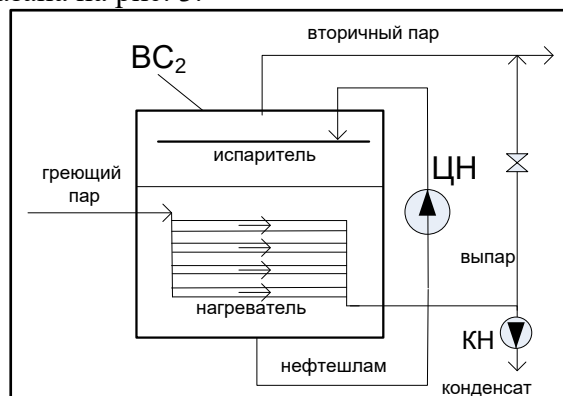


Рис. 3. Принципиальная схема утилизационной выпарной ступени

Для расчетной модели производительности установки используем параметры:

G_1, G_2 (кг/с) – расход пара, образующиеся в выпарных ступенях в установившемся режиме работы, при этом температуры нефтешлама в обеих ступенях не изменяются. Расход пара G_1 , выходящего из основной ступени BC_1 , обогреваемой водой, принимаем заданной и постоянной величиной.

r_1, r_2 (кДж/кг) – теплота конденсации (испарения) водяного пара при давлениях p_1 и p_2 . В диапазоне давлений от 0,006 до 0,06 МПа, при диапазоне температур конденсации $36,2 \div 85,9$ °С, теплота конденсации изменяется в пределах от 2293 до 2416 кДж/кг.

$Q_1 = G_1 \cdot r_1$ (Вт) – тепловой поток, выделяющийся при полной конденсации первичного пара с расходом G_1 внутри труб нагревателя утилизационной ступени BC_2 ; $Q_2 = G_2 \cdot r_2$ (Вт) – тепловой поток, затрачиваемый на образование вторичного пара с расходом G_2 , который выделяется при его конденсации.

В емкость утилизационной выпарной ступени ВС₂, показанной на рис. 3, загружается подогретый нефтешлам. После того, как в основной выпарной ступени ВС₁ начнется процесс выпаривания, первичный пар, выходящий из нее с температурой t_1 и давлением p_1 поступает внутрь греющих труб утилизационной ступени ВС₂, где конденсируется примерно при той же температуре и давлении, если не учитывать некоторого снижения давления пара из-за гидравлических потерь. После начала обогрева утилизационной ступени происходит нагрев нефтешлама до температуры испарения t_2 , определяемой давлением p_2 в емкости утилизационной ступени, после чего в ней начинается процесс выпаривания влаги из нефтешлама.

Выпаривание в основной и утилизационной ступенях происходит под вакуумом, который создается за счет конденсации образующегося пара в следующей ступени, и за счет откачки неконденсирующихся газов водяным эжектором, а так же конденсата пара – конденсатным насосом. При этом, давление p_2 в утилизационной ступени ВС₂ меньше давления p_1 в основной ступени ВС₁. Нагретый нефтешлам забирается из нижней части емкости выпарных ступеней циркуляционными насосами ЦН и подается на полки испарителя, расположенные в верхней части емкости, служащие для увеличения массообменной поверхности нефтешлама. При частичном испарении влаги на полках испарителя нефтешлам охлаждается на несколько градусов, и стекает обратно в нижнюю часть емкости выпарных ступеней.

Рассмотрим установившийся режим работы установки, когда обе выпарные ступени работают в режиме выпаривания. Пусть p_1, p_2 – абсолютные давления внутри выпарных ступеней, которым соответствуют температуры образующегося в них сухого насыщенного пара $t_{п1}, t_{п2}$. Максимальный температурный напор между греющим паром и нефтешламом в утилизационной ступени ВС₂ равняется $\Delta t_{\max} = t_{п1} - t_{п2}$; средний температурный напор составляет $\Delta t = \zeta \cdot \Delta t_{\max}$, где коэффициент $\zeta \leq 1$ – зависит от гидравлических потерь при движении греющего пара, и от расхода нефтешлама, перекачиваемого циркуляционным насосом в утилизационной ступени ВС₂, влияющего на среднюю температуру нефтешлама в емкости. Чем меньше гидравлические потери и больше расход нефтешлама, тем ближе коэффициент ζ к единице. Для максимального снижения гидравлических потерь нужно использовать схему с параллельным движением пара внутри греющих труб.

Тепловой баланс утилизационной ступени ВС₂ запишем в виде:

$$Q_2 = \eta \cdot Q_1,$$

где $\eta = 0,97...0,99$ – тепловой к.п.д. утилизационной ступени. За счет надлежащей тепловой изоляции наружной поверхности корпуса ступени можно обеспечить значение величины $\eta \geq 0,99$. Если принять $\eta = 1$ и $r = \text{const}$, то в установившемся режиме будет выполняться: $Q_1 = Q_2$; $G_1 = G_2$. Суммарная производительность установки БРНШ по расходу выпариваемой влаги составит $G_{\Sigma} = 2 \cdot G_1$.

Выводы. Таким образом, расчет показывает, что при неизменяемом расходе топлива, сжигаемого в водогрейном котле, производительность установки по предложенной схеме возрастет примерно в два раза. При этом удельный расход топлива (на 1 кг выпаренной влаги) уменьшится также в два раза.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Куклин, А. А. Анализ причин появления нефтешламов и необходимости их переработки / А. А. Куклин, Е. В. Сыцянюк // Семьдесят пятая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием: Сборник материалов конференции. В 3-х частях, Ярославль, 20–21 апреля 2022 года. Том 75. – Ярославль: Ярославский государственный технический университет, 2022. – С. 370-372. – EDN ICQEZR.

2. Тарасов, М. Ю. Технологический расчёт нефтегазосепарационного оборудования с помощью корреляционных зависимостей вязкости водонефтяных эмульсий от плотности нефти / М. Ю. Тарасов, Е. В. Портнягина, С. С. Иванов // ПроНефть. Профессионально о нефти. – 2022. – Т. 7, № 2 (23). – С. 107-113.
3. Термомеханическое обезвоживание высокоустойчивых дисперсных систем жидких продуктов пиролиза / А. Г. Сафиулина [и др.] // Химия и технология топлив и масел. – 2018. – № 3 (607). – С. 15-18.
4. Методы утилизации нефтяных шламов / И. Ш. Хуснутдинов, А. Г. Сафиулина, Р. Р. Заббаров, С. И. Хуснутдинов // Химия и химическая технология (Изв. вузов). – 2015. – Т. 58, Вып. 10. – С. 3-18.
5. Тищенко, Н. М. Характеристика нефтешламов и причины необходимости их переработки / Н. М. Тищенко, С. В. Богданов, Л. В. Кончина // Теоретический и практический потенциал в АПК, лесном хозяйстве и сфере гостеприимства : Материалы Национальной научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, Рязань, 04 марта 2021 года. – Рязань: Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева, 2021. – С. 128-133. – EDN HCDDEV.
6. Лукин, С. В. Тепловой расчет установки по выпариванию влаги из нефтепродуктов / С. В. Лукин, Н. Н. Синицын, А. Н. Сурикова // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2015. – № 4 (65). – С. 33-37.

Поступила в редакцию 24.02.2025 г., рекомендована к печати 11.03.2025 г.

INCREASED EFFICIENCY IN OIL SLUDGE SEPARATION UNITS DUE TO THE INSTALLATION OF RECYCLING STAGES

Surikova A.N., Soloveva E.V., Starostin A.V.

Measures are proposed to improve the efficiency of the thermal operation of the sludge separation unit, a method for utilizing the heat of steam escaping from the sludge is considered, as well as increasing the intensity of moisture evaporation limited by the performance of a vacuum pump, and a scheme for a multi-stage evaporation unit for sludge dewatering is proposed.

Keywords: BRNSH, oil sludge, vacuum pump, evaporator heater, recycling heat exchanger.

Сурикова Алиса Николаевна

кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения, ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», Российская Федерация, г. Вологда.
E-mail: alisa-surikova@bk.ru

Surikova Alisa Nikolaevna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Heat and Gas Water Supply of Vologda State University, Russia Federation, Vologda.

Соловьева Екатерина Вячеславовна

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой архитектуры и градостроительства ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», Российская Федерация, г. Вологда.
E-mail: evsvologda@mail.ru

Soloveva Ekaterina Viacheslavovna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Architecture and Urban Planning of the Vologda State University, Russia Federation, Vologda.

Старостин Александр Владимирович

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», Российская Федерация, г. Вологда.
E-mail: starostinav@vogu35.ru

Starostin Aleksandr Vladimirovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Vologda State University, Russia Federation, Vologda.

ОЦЕНКА ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛАСТИНЧАТОГО ТЕПЛООБМЕННИКА ПО КРИТЕРИЮ КОМПАКТНОСТИ

© 2025 *Ряжских А.В.*

На основе анализа сопряженной задачи Гретца для пластинчатых теплообменников в предположении движения теплоносителей в режиме идеального вытеснения с осреднением температурных полей по поперечным сечениям проточных каналов и с передачей теплоты через термически тонкую поверхность определен «идеальный» теплообменник с минимальной площадью теплопередачи. Это позволило ввести показатель эффективности теплообменника по критерию компактности. Корректность использования введенного показателя продемонстрирована на конкретном примере, при этом точность оценки эффективности теплообменника составила не более 1.5%

Ключевые слова: пластинчатый теплообменник, задача Гретца, прямоток, противоток, тепловая эффективность, компактность.

Введение. Эффективность технической системы, в том числе и теплообменников, верифицируется на основе сравнительного анализа по характеристикам «идеального» объекта [1], однако четкого определения «идеальных» теплообменников пока нет [2]. Тем не менее понятие эффективности обеспечивает адекватную оценку тепловой производительности, одновременно показывая, насколько близко функционирование аппарата к оптимальному режиму, и возможны ли и оправданы ли дальнейшие его модернизации.

Впервые понятие энергетического коэффициента введено в [3] для анализа теплообменных аппаратов как отношение количества переданной теплоты к затратам мощности на преодоление гидравлических сопротивлений, однако из-за неоднозначности, возникающей в зависимости от принятых скоростей теплоносителей, соотношения коэффициентов теплоотдачи, температур и других факторов, такое определение не нашло широкого применения [4].

В настоящее время используются несколько подходов для анализа эффективности теплообменников. В методе логарифмической разности температур эффективность определяется как [5]:

$$F = q / (kS\Delta T), \quad (1)$$

где k – коэффициент теплопередачи, $Вт/(м^2 \cdot К)$; S – площадь теплопередачи, $м^2$; $\Delta T = [(T_1 - t_2) - (T_2 - T_1)] / \ln[(T_1 - t_2) - (T_2 - T_1)]$; $T_{1,2}$, $t_{1,2}$ – температура «горячего» и «холодного» теплоносителей на входе и выходе из теплообменников, $К$. Такая оценка эффективности обычно используется, когда известны температуры теплоносителей на входе и выходе, а также размер теплообменника, что не всегда имеет место, например, в процессе проектирования.

В методе коэффициента полезного действия (аббревиатура NTU или ε -NTU, где NTU – число единиц переноса тепла) эффективность теплообменника определяется следующим образом [6]:

$$\varepsilon = q / [C (T - t)], \quad (2)$$

где q – скорость переноса тепла (мощность), $Вт$; $C = \min(c_{pc}, c_{ph})$, $c_{c,h} = (Gc_p)_{c,h}$ – приведенные теплоемкости «холодного» и «горячего» теплоносителей, $Вт/К$; G – массовый расход теплоносителя, $кг/с$; C – массовая теплоемкость, $Дж/(кг \cdot К)$. Отметим, что в этом методе не требуется знания размеров теплообменника.

Недавно введено понятие эффективности теплообменника через отношение эффективной скорости теплопередачи к оптимальной [7]:

$$\eta = q/q_{opt} = q/[kS(\bar{T} - \bar{t})], \quad (3)$$

где $\bar{T} = (T_1 + T_2)/2$, $\bar{t} = (t_1 + t_2)/2$.

Стремление унифицировать оценку эффективности теплообменника без детализации функционирования самого аппарата генерирует неоднозначные критерии. С другой стороны, анализ теплообменника с классических позиций фундаментальных законов явлений переноса приводит к перегруженным результатам, например [8], которыми в инженерной практике воспользоваться довольно не просто. В связи с этим разумный уровень детализации позволит преодолеть сложности в адаптации второго закона термодинамики и согласованного подхода в оценке эксплуатационных характеристик теплообменников.

Цель данного исследования заключается в синтезе критерия эффективности пластинчатых теплообменников по показателю компактности с учетом схемы организации движения теплоносителей и структуры осреднённых полей температур, полученных из решения задачи Гретца.

Постановка задачи. Рассматривается пластинчатый теплообменник длиной l с высотами проточных каналов h_1 и h_2 соответственно для «горячего» и «холодного» ньютоновских теплоносителей, имеющих постоянные теплофизические характеристики: $\rho_{1,2}$ – плотность, $кг/м^3$; $c_{p1,2}$ – массовая теплоемкость, $Дж/(кг \cdot К)$; $\lambda_{1,2}$ – теплопроводность, $Вт/(м \cdot К)$; и движущихся со скоростями $v_{1,2} = const$ в режиме идеального вытеснения. Предполагается, что теплопередающая стенка не имеет термического сопротивления, а его ограничивающие поверхности адиабатны.

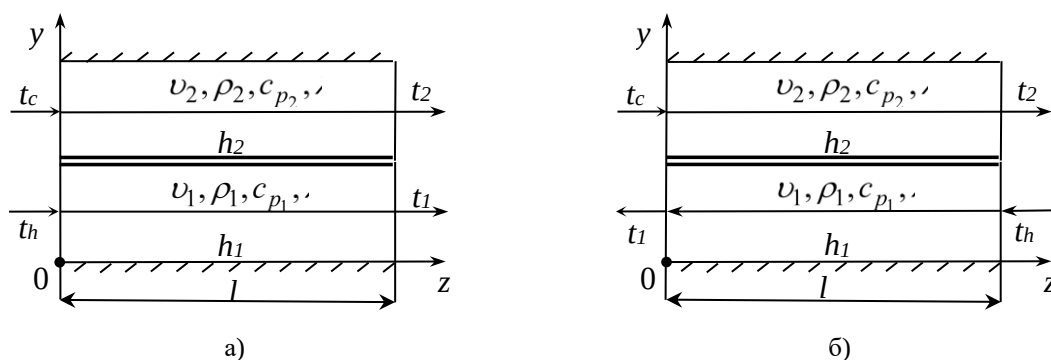


Рис. 1. Расчетная схемы пластинчатого теплообменника: а) прямоток; б) противоток

Кроме того, высоты проточных каналов больше, чем в 20 раз их ширины, что допускает рассмотрение передачи тепла в таком канале в формате 2-D и соответственно введения декартовой системы координат, как показано на рис. 1, иллюстрирующий расчетные схемы для различной топологии организации движения потоков теплоносителей в теплообменнике. Считается, что температуры «горячего» t_h и «холодного» t_c теплоносителей на входе в теплообменник известны.

Модель. В сопряженной задаче Гретца [9] будем учитывать только поперечный поток тепла аксиальному движению теплоносителей в режиме идеального вытеснения. Будем считать, что плотность этого теплового потока постоянна, тогда задача Гретца допускает представление квазисопряженными краевыми задачами:

$$\frac{\partial T_1(Y_1, Z_1)}{\partial Z_1} = \pm \frac{1}{Pe_1} \frac{\partial^2 T_1(Y_1, Z_1)}{\partial Y_1^2} \quad (+\text{прямоток, } - \text{противоток}); \quad (4)$$

$$T_1(Y_1, 0) = 1 \quad (\text{прямоток}), \quad T_1(Y_1, L) = 1 \quad (\text{противоток}) \quad (5)$$

$$\frac{\partial T_1(0, Z_1)}{\partial Y_1} = 0, \quad \frac{\partial T_1(1, Z_1)}{\partial Y_1} = -Nu_1; \quad (6)$$

$$\frac{\partial T_2(Y_2, Z_2)}{\partial Z_2} = \frac{1}{Pe_2} \frac{\partial^2 T_2(Y_2, Z_2)}{\partial Y_2^2}; \quad (7)$$

$$T_2(Y_2, 0) = 0; \quad (8)$$

$$\frac{\partial T_2(1+\xi, Z_2)}{\partial Y_2} = 0, \quad \frac{\partial T_2(1, Z_2)}{\partial Y_2} = -Nu_2, \quad (9)$$

где $Y_{1,2} = y/h_{1,2}$; $L = l/h_1$; $Z_{1,2} = z/h_{1,2}$; $Pe_{1,2}^* = \nu_{1,2} h_{1,2} / a_{1,2}$ – числа Пекле; $T_{1,2}(Y, Z) = [t_{1,2}(y, z) - t_c] / (t_h - t_c)$; $a_{1,2} = \lambda_{1,2} / (\rho_{1,2} c_{p,1,2})$ – температуропроводность, m^2/c ; $\vec{Nu}_{1,2} = \vec{q} h_{1,2} / [\lambda_{1,2} (t_h - t_c)]$, $\vec{Nu}_{1,2} = \vec{q} h_{1,2} / [\lambda_{1,2} (t_h - t_c)] = -$ числа Нуссельта; $\vec{q}$, $\vec{q}$ – количество теплоты передаваемое в прямоточном и противоточном теплообменниках, $Вт/м^2$.

Процедура осреднения температурных полей $\bar{T}_1(Z)$, $\bar{T}_2(Z)$ по поперечному сечению проточных каналов теплообменника сводит задачу (4-9) к задачам типа Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений, решения которых:

для прямотока (рис. 2а):

$$\bar{T}_1(Z_1) = 1 - \frac{\vec{Nu}_1}{Pe_1} Z_1, \quad \bar{T}_2(Z_2) = \frac{\vec{Nu}_2}{Pe_2} Z_2;$$

для противотока (рис. 2б):

$$\bar{T}_1(Z_1) = 1 - \frac{\vec{Nu}_1}{Pe_1} (L - Z_1), \quad \bar{T}_2(Z_2) = \frac{\vec{Nu}_2}{Pe_2} Z_2.$$

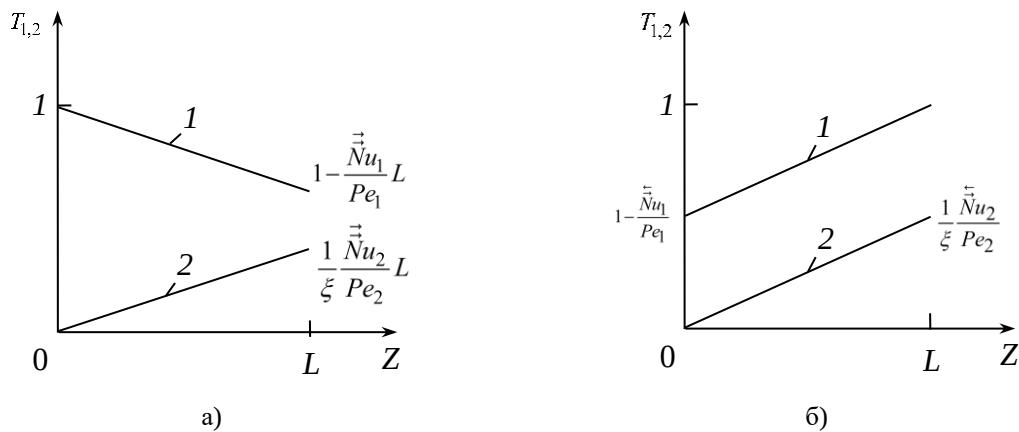


Рис. 2. Качественное поведение аксиальных безразмерных температур теплоносителей в проточных каналах: а) прямоток; б) противоток (1 – T_1 ; 2 – T_2)

«Идеальный» теплообменник. Для «идеального» прямоточного теплообменника должно выполняться условие, по которому определяется длина теплообменника (рис. 3а):

$$\vec{L} = \left(\frac{\vec{Nu}_1}{Pe_1} + \frac{\vec{Nu}_2}{\xi Pe_2} \right)^{-1},$$

где $\xi = h_2/h_1$.

В случае противотока для «идеального» теплообменника выполняются соотношения (рис. 3б):

$$\vec{L} = \frac{Pe_1}{\vec{Nu}_1} = \xi \frac{Pe_2}{\vec{Nu}_2}. \quad (10)$$

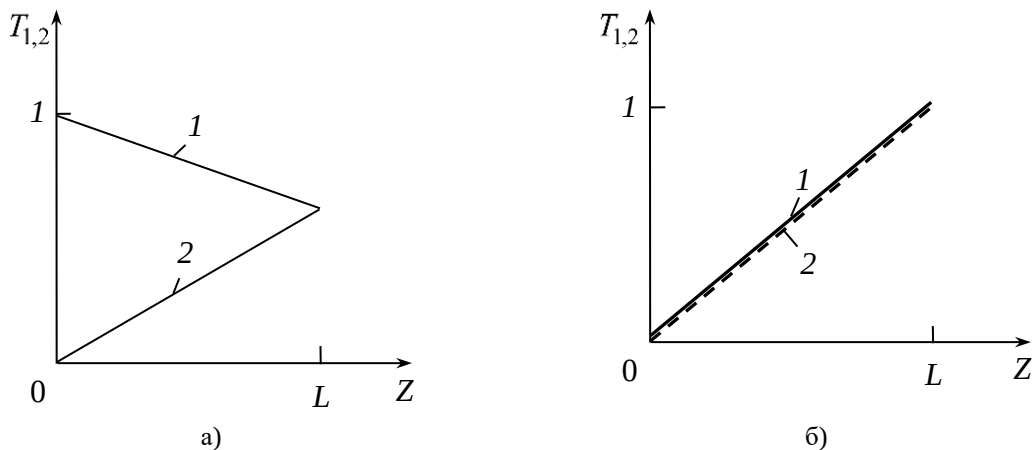


Рис. 3. Качественные профили температур в «идеальных» теплообменниках: а) прямоток; б) противоток (1 – T_1 ; 2 – T_2)

Из равенства $\vec{L} = \vec{L}$ следует, что:

$$\frac{\vec{q}}{\vec{q}} = 1 + \frac{Pe_1}{\Lambda Pe_2} > 1,$$

где $\Lambda = \lambda_2 / \lambda_1$, т.е. при одной и той же геометрии противоточный теплообменник эффективнее прямоточного.

Это позволяет ввести показатель эффективности теплообменника по параметру компактности:

$$\gamma = \frac{\vec{S}_0}{\vec{S}} \cdot 100\% = \frac{\vec{S}_0}{\vec{S}} \cdot 100\%, \quad (11)$$

где $\vec{S}_0$, $\vec{S}_0$ – площади поверхности теплопередачи «идеального» теплообменников; $\vec{S}$, $\vec{S}$ – площади поверхностей теплопередачи реальных теплообменников.

Пример. Проанализируем теплообменник, который проектируется для охлаждения нефти с расходом $G_1=10000 \text{ кг/час}$ с температуры $t_h=160^\circ\text{C}$ до $t_1=94^\circ\text{C}$ водой с таким же расходом $G_2=10000 \text{ кг/час}$, нагреваемой при этом от $t_c=16^\circ\text{C}$ до $t_2=84^\circ\text{C}$, коэффициент теплопередачи известен $k=355 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{K)}$ с одинаковыми проходными сечениями для теплоносителей [10].

Примем противоточную схему движения теплоносителей, считая корпус теплообменника теплоизолированным, тогда тепловой поток от протекающей нефти через него составит:

$$\vec{q}_1 = k(t_h - t_1) = k\Delta t_1.$$

Воспользуемся соотношением (10), тогда, с учетом того, что:

$$\vec{Nu}_1 = \frac{\vec{q}_1 h}{\lambda_1 \Delta t}, \quad Pe_1 = \frac{G_1 h c_{p_1}}{\lambda_1 S_{сеч}},$$

где λ_1 , c_{p_1} – теплопроводность и теплоемкость нефти, $\text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$, $\text{Дж/(кг}\cdot\text{K)}$; h – характерный размер проходного сечения каналов для теплоносителей, м; $S_{сеч}$ – площадь поперечного сечения каналов, м^2 ; $\Delta t = t_h - t_c$, получим ($c_{p_1} = 2000 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$) [11]):

$$\vec{S}_0 = \frac{G_1 c_{p_1}}{k} \frac{\Delta t}{\Delta t_1} = 34,144 \text{ м}^2.$$

Согласно [10] площадь теплопередачи спроектированного теплообменника составляет $33,71 \text{ м}^2$, что по критерию компактности близко к «идеальному» теплообменнику. Т.о. спроектированный теплообменник согласно (11) $\gamma \approx 1.5\%$. В соответствии с (1-3) имеем $F = 0,91$; $\varepsilon = 0,854$; $\eta = 0,883$, т.е. отклонение от среднего 0,882 всех оценок не превышает 3%.

Выводы. Построенная модель «идеального» теплообменника с минимальной площадью теплопередачи позволяет ввести новый показатель эффективности по критерию компактности, который по точности превосходит общепринятые критерии и отражает не только второй закон термодинамики, но и учитывает структуру потоков теплоносителей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Надежность и эффективность в технике: справочник. Т.1. / под. ред. А.И. Рембезы. – М.: Машиностроение, 1986. – 224с.
2. Tsvilin, A. M. Ideal heat exchange system / A. M. Tsvilin // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2017. – V.90(3). – P. 1-8.
3. Кирпичев, М. В. Теория подобия и тепловое моделирование / М. В. Кирпичев. – М.: Наука, 1987. – 163 с.
4. Мигай, В. К. Повышение эффективности современных теплообменников / В. К. Мигай. – Л.: Энергия, 1980. – 144с.
5. Serth R. W. Process heat transfer: Principles, Application and Rules of Thumb / R. W. Serth, T. G. Lestina. – NY: Academic Press, 2014. – 609 p.
6. Кэйс, В. М. Компактные теплообменники / В. М. Кэйс, А. Л. Лондон. – М.: Энергия, 1967. – 224 с.
7. Fakher, A. An alternative approach for determining log mean temperature difference correction factor and number of shells in shell and tube heat exchangers / A. Fakher // Journal of Enhanced Heat Transfer. – 2003. – V. 10 (4). – P. 407-420.
8. Vera, M. Laminar counterflow parallel-plate heat exchangers: Exact and approximate solution / M. Vera, A. Linan // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2010. – V. 53. – P. 4886-4898.
9. Dezfoli, A. R. Two dimensional temperature distributions in plate heat exchangers. An analytical approach / A.R. Dezfoli, M. A. Mehrabian, M. H. Safforipour // Mathematics. – 2015. – V. 3. – P. 1255-1273.
11. Fakher, A. Heat exchanger efficiency / A. Fakher // Transactions of the ASME. – 2007. – V.129. – P. 1268 - 1276.
12. Трубопроводный транспорт нефти и газа / Р. А. Алиев, В. Д. Белоусов, А. Г. Немудров [и др.]. – М.: Недра, 1988. – 388с.

Поступила в редакцию 05.03.2025 г., рекомендована к печати 20.03.2025 г.

ASSESSMENT OF THERMAL EFFICIENCY OF A PLATE HEAT EXCHANGER BY COMPACT CRITERION

Riazhsikh A.V.

Based on the analysis of the conjugate Graetz problem for plate heat exchangers under the assumption of the movement of coolants in the ideal displacement mode with averaging of temperature fields over the cross sections of flow channels and with heat transfer through a thermally thin surface, an “ideal” heat exchanger with a minimum heat transfer area was determined. This made it possible to introduce a heat exchanger efficiency indicator based on the compactness criterion. The correctness of using the introduced indicator is demonstrated using a specific example, while the accuracy of assessing the efficiency of the heat exchanger was no more than 1.5%.

Keywords: plate heat exchanger, Graetz problem, forward flow, counter flow, thermal efficiency, compactness.

Рязских Александр Викторович

кандидат физико-математических наук, доцент
кафедры прикладной математики и механики
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет»,
Российская Федерация, г. Воронеж,
Email: ryzhskikhav@bk.ru

Riazhsikh Aleksandr Viktorovich

Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor at Department of Applied
Mathematics and Mechanics, Voronezh State
Technical University,
Russian Federation, Voronezh.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ КОНЦЕНТРАЦИОННОГО ПОЛЯ В ПОЛУСФЕРЕ НА ТЕРМИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНОЙ ДИФФУНДИРУЮЩЕЙ ПОДЛОЖКЕ© 2025 *Хвостов А.А., Ряжских А.В., Хаустов И.А., Иванов А.В.*

В работе рассмотрен синтез математической модели, формализующей нестационарное поле концентрации вещества в объеме капли в форме полусферы, расположенной на плоской термически неоднородной поверхности. Конвективное движение вещества в объеме обусловлено термоконвекцией жидкости, вызываемой температурным контрастом подложки. Сопряженные уравнения сохранения импульса, энергии и массы для несжимаемой ньютоновской решались численно методом конечных элементов. Показана связь между температурным контрастом подложки и скоростью роста среднеобъемной концентрации вещества. Предложены варианты использования термически неоднородных теплообменных поверхностей для интенсификации тепломассообменных процессов.

Ключевые слова: тепломассообмен, термоконвекция, математическое моделирование.

Введение. Развитие технологий микрореакторов [1, 2], поверхностной абсорбции аэрозолями газов и жидкостей [3], абсорбции лекарственных препаратов биологическими жидкостями [4], доставки питательного субстрата микроорганизмам в биореакторах [5] ставит задачи интенсификации физико-химических и микробиологических процессов, а также выравнивания концентраций дисперсного вещества в микрообъеме реакционной среды без использования механических устройств. Эти задачи решаются заданием физических параметров каналов (форма и размеры сечения, введение турбулизаторов потока, лабиринтов, пористых элементов) и напорно-расходных параметров потока реакционной среды [5-6]. Создание необходимого перепада давления и одновременное обеспечение заданного времени пребывания реакционной среды в реакторе требует дополнительного объема для циркуляции среды и усложняет конструкцию реактора. Одним из способов задания необходимого для перемешивания гидродинамического режима является термоконвекция, обусловленная температурной неоднородностью среды и балансом сил гравитации и плавучести [7, 8]. В этом случае механизм термоконвекции служит движущей силой перемещения и перемешивания жидкости [9].

Математическая модель. Рассмотрим процессы тепломассопереноса в 2D сечении капли жидкости в форме полусферы, которая расположена на подложке с веществом, диффундирующим в объем капли (рис. 1).

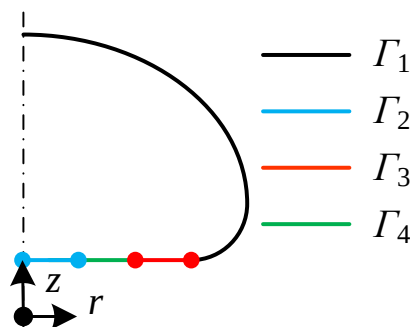


Рис. 1. Расчётная схема

На границе Γ_1 задан конвективный теплообмен с окружающей средой, нулевой градиент концентрации и нулевая нормальная границе составляющая вектора скорости; на Γ_2 – температура охлаждаемого сегмента подложки T_x , нулевые градиент концентраций и скорость; на Γ_3 – температура подогреваемого сегмента подложки T_z , нулевые градиент концентраций и скорость; на Γ_4 – теплоизоляция, нулевые градиент концентраций и скорость.

Уравнения сохранения импульса, энергии, массы:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \rho (\bar{u} \cdot \nabla) \bar{u} = \nabla \cdot \left\{ -p + \mu \left[\nabla \bar{u} + (\nabla \bar{u})^T \right] \right\} + \rho \bar{g}; \\ \nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0; \\ \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \bar{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\lambda \nabla T); \\ \frac{\partial C}{\partial t} + \bar{u} \cdot \nabla C = \nabla \cdot (D \nabla C), \end{array} \right. , \quad (1)$$

где $\bar{u}$ – скорость, м/с; ρ – плотность, кг/м³; p – давление, Па; t – время, с; μ – динамическая вязкость, Па·с; $\bar{g}$ – ускорение свободного падения, м/с²; T – температура, К; c_p – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); λ – коэффициент теплопроводности, Дж/(с·м²·К); C – концентрация, об. доля; D – коэффициент молекулярной диффузии.

Начальные условия $\bar{u}|_{t=0} = 0$, $p|_{t=0} = p_0$, $T|_{t=0} = T_0$, $C|_{t=0} = C_0$.

Граничные условия на Γ_1 : $-\lambda \frac{\partial T}{\partial \bar{n}} = \alpha(T - T_{oc})$, $\bar{u} \cdot \bar{n} = 0$, $\frac{\partial C}{\partial \bar{n}} = 0$; Γ_2 : $T = T_x$, $\bar{u} = 0$, $C = 1$;

Γ_3 : $T = T_z$, $\bar{u} = 0$, $C = 1$; Γ_4 : $\frac{\partial T}{\partial \bar{n}} = 0$, $\bar{u} = 0$, $C = 1$, где p_0 , T_0 , C_0 – начальные значения давления, температуры и концентрации, α – коэффициент теплоотдачи к воздуху окружающей среды, Вт/(м²·К); $\bar{n}$ – единичный вектор нормали к поверхности; T_{oc} – температура окружающей среды, К.

Вычислительный эксперимент. Система (1) решена численно методом конечных элементов в Comsol Multiphysics на сетке из 3736 элементов. В качестве модельной жидкой среды использована вода, теплофизические параметры которой взяты при нормальных условиях и температуре 293 К. Параметры вычислительного эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры вычислительного эксперимента

№	Название, обозначение	Значение	Единица измерения	№	Название, обозначение	Значение	Единица измерения
1	Плотность, ρ	1000	Кг/м ³	7	Начальная температура, T_0	293	К
2	Динамическая вязкость, μ	10 ⁻³	Па·с	8	Температура холодного сегмента, T_x	273	К
3	Удельная теплоемкость, c_p	4200	Дж/(кг·К)	9	Температура горячего сегмента, T_z	313	К
4	Коэффициент молекулярной диффузии, D	10 ⁻⁹	м ² /с	10	Начальная концентрация, C_0	0	Долей объема
5	Начальное давление, p_0	1	атм	11	Коэффициент теплоотдачи, α	11	Дж/(с·м ² ·К)
6	Размеры капли, диаметр полусферы, d	1	мм				

Вычислительный эксперимент включал в себя расчет нестационарных полей температуры, скорости и концентрации с заданием температурной неоднородности на диффундирующей подложке. Для анализа термической и концентрационной обстановки в вычислительной области дополнительно рассчитывались среднеобъемные температура, концентрация, а также фактор однородности Ψ в направлении осей r, z как осредненные по расчетной области компоненты вектора градиента концентрации $\frac{\partial C}{\partial r}, \frac{\partial C}{\partial z}$ и его модуль с учётом симметричности постановки задачи:

$$\Psi = \sqrt{\left(\frac{\partial C}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial z}\right)^2}.$$

Результаты вычислительного эксперимента показали генерацию гидродинамических циркуляционных потоков как в случае термически однородной диффундирующей подложки, так и при задании на подложке зон с разной температурой. При этом разница температур в контактных зонах существенно влияет на интенсивность гидродинамических потоков (рис. 2а, 2б).

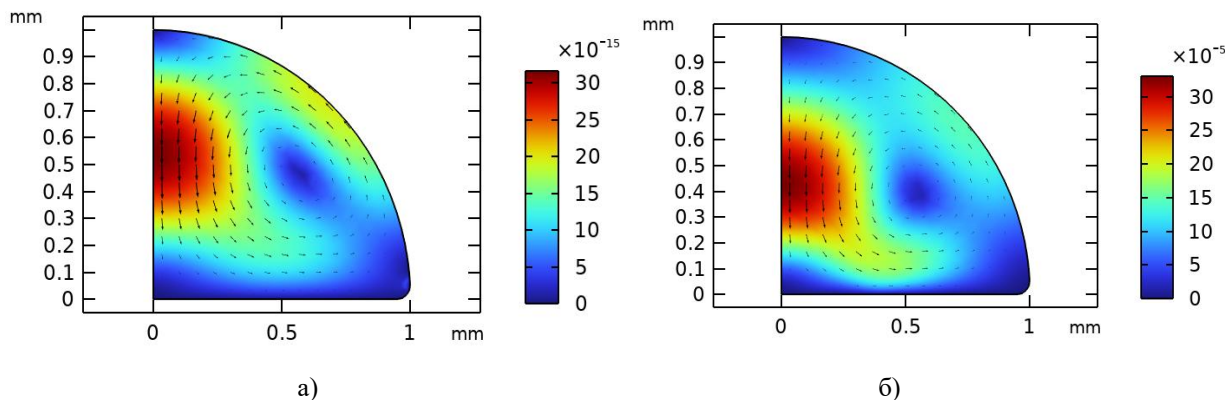


Рис. 2. Поле скорости на термически однородной (а) и неоднородной (б) подложке

Так, при задании на Γ_2 температуры 273 К (-20 К от начальной температуры), а на Γ_3 313 К (+20 К к начальной температуре) максимальный модуль скорости увеличился на 5 порядков по сравнению с термически однородной подложкой (рис. 2а, 2б).

Анализ результатов. Характер гидродинамических потоков в объеме на термически однородной подложке характеризуется наличием двух симметричных ячеек Рэлея – Бенара (рис. 2а), в то время как на термически неоднородной подложке генерируется один циркуляционный поток (рис. 2б).

Поле температуры над термически однородной подложкой характеризуется вертикальной стратификацией жидкости (рис. 3а), в то время как при термически неоднородной подложке температурный градиент обусловлен локализацией горячего и холодного сегмента подложки (рис. 3б).

Увеличение скорости потока на термически неоднородной подложке приводит к более интенсивному переносу вещества, так как существенно увеличивается конвективная составляющая уравнения переноса $\vec{u} \cdot \nabla C$. В случае термически однородной подложки формируется вертикальная концентрационная стратификация, обусловленная механизмом молекулярной диффузии (рис. 4а). Задание термической неоднородности приводит к большей равномерности распределения вещества (рис. 4б).

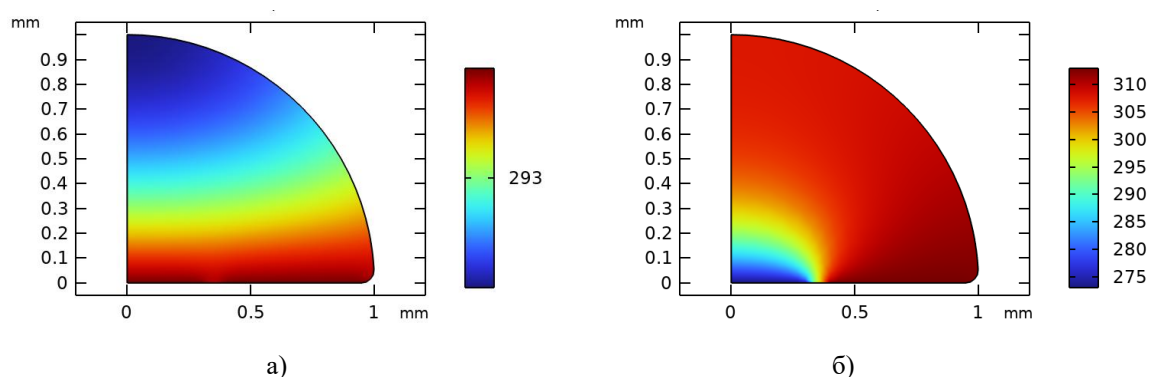


Рис. 3. Температурное поле на термически однородной (а) и неоднородной (б) подложке

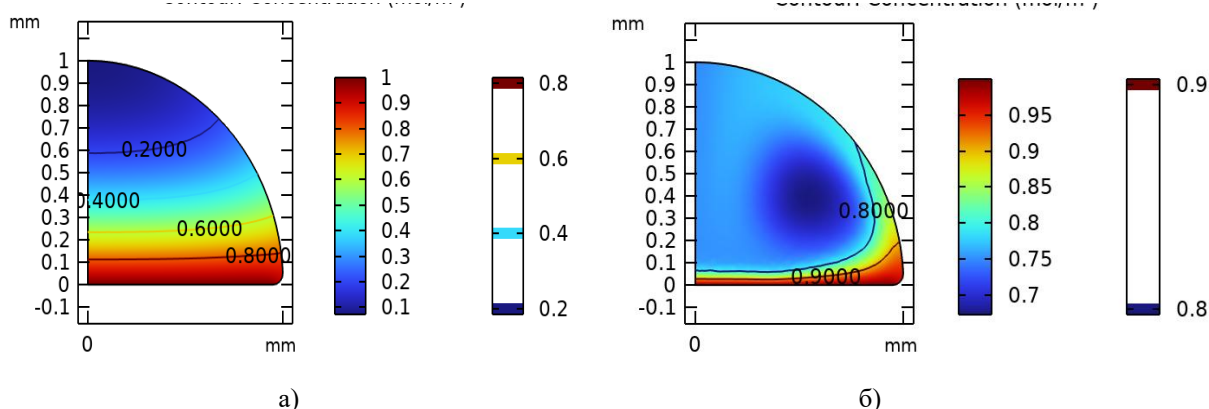


Рис. 4. Концентрационное поле на термически однородной (а) и неоднородной (б) подложке

Стоит отметить, что, несмотря на симметричный геометрически (равные по длине «горячий» и «холодный» сегменты) и энергетически (± 20 K) подвод (отвод) тепловой энергии, происходит увеличение осреднённой по расчетной области температуры (рис. 5).

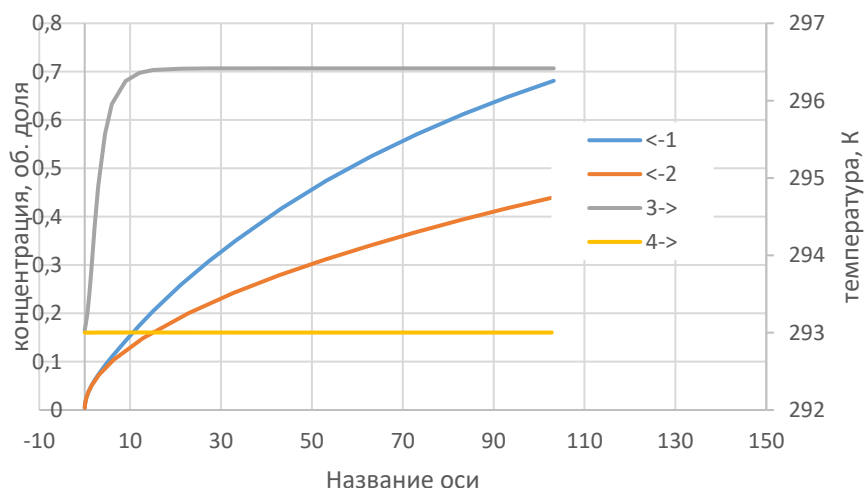


Рис. 5. Динамика изменения средней по расчетной площади концентрации на термически неоднородной (кривая 1) и однородной (кривая 2) подложке, а также динамика изменения средней по расчётной площади температуры на термически неоднородной (кривая 3) и однородной (кривая 4) подложке

Это объясняется доминированием конвективного восходящего потока через «горячий» сегмент подложки по сравнению с «холодным» сегментом (рис. 2а, 2б).

Динамика изменения однородности распределения диффундирующего из подложки вещества по объему жидкости также существенно отличается для термически однородной и неоднородной подложек (рис. 6а, 6б). Так, на термически неоднородной подложке происходит более интенсивное выравнивание концентрации по высоте (кривая 1), а также по радиусу капли (кривая 2). В начальные моменты времени наблюдается экстремум z составляющей вектора градиента концентрации (кривая 3), а также его модуля (рис. 6б), что обусловлено формированием циркуляционного потока (рис. 2б).

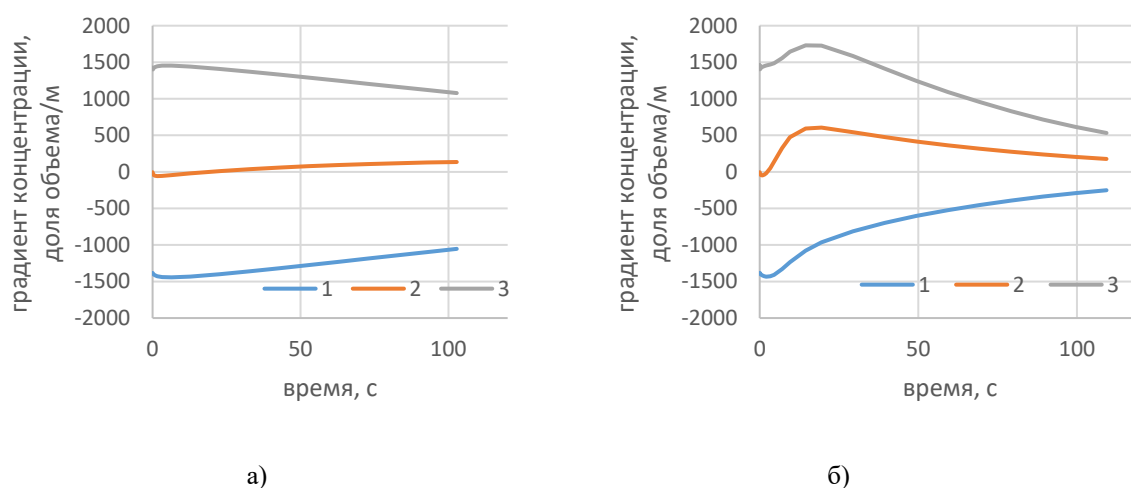


Рис. 6. Динамика осреднённой по расчетной области z компоненты (кривая 1), r компоненты (кривая 2) и модуля Ψ вектора градиента концентраций (кривая 3) на термически однородной (а) и неоднородной (б) подложке

Выводы. Проведенные вычислительные эксперименты с использованием математической модели процессов тепломассопереноса в объеме полусферической капли жидкости показали связь между температурным контрастом подложки и скоростью роста среднеобъемной концентрации вещества, а также возможность организации термоконвекционных потоков, достаточных для увеличения интенсивности перемешивания, а также однородности распределения вещества по объёму.

Для организации температурной неоднородности необходимо обеспечить как подвод разнонаправленных тепловых потоков, так изоляцию между областями нагрева и охлаждения подложки с целью устранения теплоперетоков между ними по механизму теплопроводности. Задача осложняется ввиду малых геометрических размеров объема со средой. В качестве технического решения по организации таких неоднородных подложек можно использовать матрицы с термоэлектрическими элементами Пельтье-Зеебека, изолированными друг от друга. В этом случае в перспективе возможна организация термически неоднородных подложек для микрореакторов и их элементов: теплообменных устройств, абсорберов, химических и биореакторов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Scale-up of micro- and milli-reactors: An overview of strategies, design principles and applications / Z. Dong [et al.] // Chemical Engineering Science X. – 2021. – V. 10. – P.100097.
2. Microchannel reactor heat-exchangers: A review of design strategies for the effective thermal coupling of gas phase reactions / N. Engelbrecht [et al.] // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. – 2020. – V. 157. – P. 108164.
3. Chen, W-H. An analysis of gas absorption by a liquid aerosol in a stationary environment / W.-H. Chen // Atmospheric Environment. – 2002. – V. 36(22). – P. 3671–3683.
4. Water transport and absorption in pharmaceutical tablets – a numerical study /P. Vaitukaitis [et al.] // Meccanica. – 2020. – V. 55. – P. 421–433.
5. Taweel, A. M. Effect of Mixing on Microorganism Growth in Loop Bioreactors / A. M. Taweel, Q. Shah, B. Aufderheide // International Journal of Chemical Engineering. – 2012. – 12 p.
6. Mixing performance in T-shape microchannel at high flow rate for Villermaux-Dushman reaction / L. Peng [et al.]// Microchemical Journal. – 2020. – V. 155. – P. 104662.
7. Ferrouillat, S. Micromixing enhancement by turbulence: Application to multifunctional heat exchangers / S. Ferrouillat, P. Tochon, H. Peerhossaini // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. – 2006. – V. 45(8). – P. 633–640.
8. Pressure drop and mixing in single phase microreactors: Simplified designs of micromixers / C. P. Holvey [et al.] // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. – 2011. – V. 50(10). – P. 1069–1075.
9. Лыков, А. В. Конвекция и тепловые волны / А. В. Лыков, Б. М. Берковский. – М.: Энергия, 1974. – 336 с.

Поступила в редакцию 18.03.2025 г., рекомендована к печати 04.04.2025 г.

MODELING THE DYNAMICS OF A CONCENTRATION FIELD IN A HEMISPHERE ON A THERMALLY INHOMOGENEOUS DIFFUNDATING SUBSTRATE

KHvostov A.A., Riazhskikh A.V., KHaustov I.A., Ivanov A.V.

The paper considers the synthesis of a mathematical model formalizing the non-stationary field of substance concentration in the volume of a drop in the form of a hemisphere located on a flat thermally inhomogeneous surface. Convective motion of the substance in the volume is caused by thermal convection of the liquid caused by the temperature contrast of the substrate. The conjugate equations of conservation of momentum, energy and mass for an incompressible Newtonian were solved numerically by the finite element method. The relationship between the temperature contrast of the substrate and the growth rate of the average volume concentration of the substance is shown. Variants of using thermally inhomogeneous heat exchange surfaces for intensification of heat and mass transfer processes are proposed.

Keywords: heat and mass transfer, thermal convection, mathematical modeling.

Хвостов Анатолий Анатольевич

доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики и механики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», профессор кафедры информационных и управляющих систем ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», Российская Федерация, г. Воронеж.
E-mail: khvtol1974@yandex.ru

KHvostov Anatolii Anatolevich

Doctor of Technical Sciences, Professor at Department of Applied Mathematics and Mechanics of Voronezh State Technical University, Professor at Department of Information and Control Systems of Voronezh State University of Engineering Technologies, Russian Federation, Voronezh.

Ряжских Александр Викторович

кандидат физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики и механики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Российская Федерация, г. Воронеж.
E-mail: ryzhskihav@bk.ru

Riazhskikh Aleksandr Viktorovich

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Full Professor, Head of Department of Applied Mathematics and Mechanics of Voronezh State Technical University, Russian Federation, Voronezh.

Хаустов Игорь Анатольевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных и управляющих систем ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», Российская Федерация, г. Воронеж.
E-mail: haustov_ia@mail.ru

KHaustov Igor Anatolevich

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of Department of Information and Control Systems of Voronezh State University of Engineering Technologies, Russian Federation, Voronezh.

Иванов Андрей Валентинович

кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных систем управления процессами и производствами ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий», Российская Федерация, г. Воронеж.
E-mail: andrious@rambler.ru

Ivanov Andrei Valentinovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Automated Process and Production Control Systems of Voronezh State University of Engineering Technologies, Russian Federation, Voronezh.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБЪЕКТА КОММУНАЛЬНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

© 2025 Костюченко И.В., Старых А.В., Любская О.Г.

Статья посвящена вопросу оценки эффективности применительно к объекту коммунального энергетического комплекса (КЭС). Опираясь на исследования по энергоэффективности, менеджменту и цифровой трансформации авторы разрабатывают систему показателей эффективности по трем направлениям: эффективность используемых топлив, эффективность менеджмента, эффективность цифровизации. Дополнительно обосновано введение результатов статистических наблюдений за сравнительным уровнем аварийности и уровнем тепловых потерь. В качестве интегрального показателя предложено отношение совокупности показателей эффективности по трем направлениям к сумме статистических коэффициентов. Такой подход позволяет упростить и стандартизировать расчет эффективности предприятий КЭС по измеримым, объективным, доступным критериям, делает возможным сравнительный анализ как на уровне объекта (предприятия), так и на уровне КЭС регионов, отрасли в целом.

Ключевые слова: коммунальная энергетическая система, оценка эффективности, показатели эффективности, энергетика, топливо, цифровизация.

Введение. Оценка эффективности объектов коммунального энергетического комплекса является одним из важных условий непрерывного устойчивого развития отрасли. В научной литературе предложен целый ряд методик по выполнению данной оценки, в том числе в разрезе общей экономической эффективности предприятий [1], инвестиционной привлекательности объектов коммунального комплекса [2], в рамках модернизации для обоснования перехода на иные виды топлив [3], при расчете энергоэффективности [4, 5], а также с применением комплексного подхода [6] и др.

Цель данной статьи состоит в формулировании подхода к разработке интегрального показателя эффективности, который бы включал все указанные аспекты. Задачей исследования стала разработка системы показателей и критериев эффективности, каждый из которых обладал бы свойствами измеримости (количественно, качественно), объективности, применимости для большинства объектов энергетики коммунального сектора на всех его уровнях (котел, отдельная котельная, группа котельных или целый регион/отрасль в целом).

Это с одной стороны позволит стандартизировать и упростить подходы к методам определения эффективности предприятий энергетики коммунального сектора, а с другой - послужит основой для сравнительной оценки и прогнозирования.

Материалы и методы. Объектом исследования стала система коммунальной энергетики, т.е. совокупность объектов инфраструктуры (их конструктивные и технические особенности, документация по оценке энергоэффективности, информация по аварийности, аналитические исследования и замеры прошлых лет, связанные с оценкой эффективности работы).

В работе использовались теоретические (обобщение, анализ и синтез), эмпирические (научное наблюдение, сравнение) и математические (статистические, программирование, визуализация) методы, натурный физический эксперимент.

Они применялись в опоре на широкий спектр научной литературы вопроса, в частности идеи, высказанные такими исследователями как Аванесова Е.К., Биллер Е.Я., Борисова И.И., Гаврилина Н.П., Капустина О.С., Коваленко М.А., Коваль С.П., Литвак В.В., Олехнович Л.В., Щелоков Я.М., и многие другие. Пониманию общемирового контекста способствовали также работы зарубежных авторов, прежде всего D. Hazell, R.S. Chinangad, J.R. Thome, G.A. Dreizer, B.I. Master.

Результаты и обсуждение. Предложена система показателей для оценки эффективности объекта коммунального энергетического комплекса по трем направлениям оценки, а именно:

- эффективность используемого топлива;
- эффективность менеджмента;
- эффективность цифровизации.

Первое направление оценки (разработано в уже упомянутом [3]) – описывает модель определения наиболее эффективного вида топлива для котельных, она отражает специфику извлечения тепловой энергии при сгорании различных видов топлива.

Показатель включает следующие параметры:

- теплотворная способность топлива;
- стоимость топлива;
- выбросы при сжигании топлива продуктов горения в атмосферу, а именно – концентрация в выбросах вредных веществ относительно ПДК этих веществ в регионе);
- степень износа котельных и необходимость в масштабной реконструкции (указывается как коэффициент);
- вид топлива (не возобновляемый/возобновляемый);
- доступность запасов топлива на территории региона (или возможность организации добычи/производства).

Каждый параметр имеет свою формулу расчета и весовой коэффициент, общая формула модели определения наиболее экономически эффективного вида топлива для котельных коммунального сектора представлена как максимум целевой функции, отражающей эффективность использования того или иного вида топлива:

$$\sum_m X(i, j) * V(i) \rightarrow \max, \quad (1)$$

где:

$X(i, j)$ - значение i -го критерия, для j -го вида топлива;

$V(i)$ – весовые коэффициенты, отражающие значимость конкретного критерия.

Задействованные в этой группе параметры содержат как технические характеристики, так и стоимостные, экологические аспекты. Модель позволяет понять насколько эффективной является работа объекта энергетики на данном типе топлива, обосновать переход на иные, альтернативные источники энергии, сравнивать работу коммунальных объектов энергетики разных типов, регионов и т.п.

Второе направление оценки (на базе принципов, выдвинутых в [7]) связано с особенностями менеджмента на объекте энергетики.

Во всем многообразии показателей этого направления для целей нашего исследования избраны следующие параметры:

- коэффициент загрузки оборудования объекта энергетики (например, котельной);
- время простоя оборудования на объекте;
- оценка удовлетворенности работников объекта условиями труда и организацией работы.

Как и в первом случае каждый расчетный параметр имеет свою методику расчета и свой весовой коэффициент, в целом же формула может быть представлена следующим образом:

$$M = (K1 - T1) * S_t, \quad (2)$$

где:

$K1$ - коэффициент загрузки оборудования, понимаемый как отношение фактической мощности к номинальной мощности оборудования (%)

$T1$ - время простоя оборудования, когда оборудование не работает из-за технических неисправностей или плановых ремонтов, выраженное в % от общего времени работы;

S_t - показатель доли работников, удовлетворенных условиями труда и организацией работы, относительно общего числа работников (%).

Формула этого направления оценки позволяет убедиться, что коэффициент эффективности менеджмента (M) тем выше, чем выше процент загрузки оборудования, меньше процент простоя и более высок показатель удовлетворенности работников.

Третье направление оценки эффективности связано с цифровыми технологиями. Современная ситуация характеризуется стремительной цифровой трансформацией отрасли, и не во на всех ее объектах процессы цифровизации и автоматизации проходят равномерно, с одинаковым результатом. Как правило, к 2025 г. крупные объекты коммунальной энергетики имеют автоматизированную систему диспетчеризации, плановых технических осмотров и предупреждения аварийных состояний. Некоторые из них дополнительно автоматизировали функции, связанные с подачей топлива, контролем температурного режима. На некоторых из объектов начинается внедрение элементов Интернета вещей («умные» сенсоры осуществляют передачу данных об измерениях в центральный пункт контроля). Иными словами, уровень проникновения цифровизации, а также затраты и реальная польза таких преобразований также сказываются на эффективности работы объекта коммунальной энергетика и должны быть учтены. Чтобы измерить влияние данных процессов на эффективность коммунальной энергетической системы, авторами разработан и предложен индекс эффективности цифровизации.

В его основе идеи, обсужденные в [8], [9] и [10], а также следующие параметры:

- уровень проникновения цифровизации (выраженный как доля автоматизированных процессов от общего числа процессов на предприятии);
- эффект цифровизации в виде расходов на обслуживание текущего периода, выраженного в процентах к аналогичному периоду прошлого года;
- эффект цифровизации в виде задолженности по сборам платежей, выраженный в процентах по отношению к аналогичному периоду прошлого года;
- стоимость внедрения цифровых продуктов (cost of implementation) в % к выручке.

Формула индекса эффективности цифровизации имеет вид:

$$It = \frac{It_p + S_m + R}{Ci}, \quad (3)$$

где:

It_p - уровень проникновения цифровизации на объекте (%)

S_m - затраты на обслуживание автоматизированного объекта по отношению к затратам аналогичного периода прошлого года (%);

R - задолженности по сборам платежей по отношению к объемам задолженности аналогичного периода прошлого года (%);

Ci - стоимость внедрения цифровых продуктов по отношению к выручке (%).

Такой показатель обнаруживает четкую взаимосвязь между затратами на цифровизацию и теми измеримыми объективными эффектами, которые она дает и которые критически важны применительно к объекту коммунальной энергетики. Вряд ли разумно затрачивать усилия по внедрению искусственного интеллекта или иной дорогой технологии, если это не повлияет на снижение уровня затрат на обслуживание или не повысит собираемость платежей за счет удобства и прозрачности тарифов. Также не имеет смысла проводить цифровизацию всех процессов на объекте, если получаемые в этой связи данные не могут быть использованы в управлении затратами и не сказываются на платежах. Зато цифровизация, которая явно уменьшает затраты на обслуживание объекта и увеличивает собираемость платежей и при этом внедрена за счет небольшого процента от выручки может считаться весьма эффективным вложением в развитие.

Очевидно, что для определения интегрального совокупного показателя эффективности объекта в целом необходимо учитывать все три упомянутые выше направления. Но практические натурные исследования на различных объектах энергетики коммунального сектора показали, что анализ эффективности объекта энергетики будет не полным, если не внести дополнительно в расчет локальные статистические данные.

В частности, авторы предлагают использовать данные о динамике количества аварий/несчастных случаев при авариях (Li – отношение аварий текущего периода к аналогичному периоду прошлого года, выраженное в %), и данные о снижении тепловых потерь (Qp - отношение тепловых потерь текущего периода к аналогичному периоду прошлого года, в %), так как эти показатели являются ключевыми для любого объекта коммунальной энергетики и обнаруживают четкую зависимость как от эффективности технологических процессов, так и от менеджмента или уровня цифровизации.

Для отдельного объекта или группы объектов/региона общая формула интегрального показателя эффективности коммунального объекта энергетики K^i должна демонстрировать соотношение совокупности показателей эффективности объекта по трем направлениям и статистических показателей в динамике, а именно:

$$K^i = \frac{X + M + It}{Li + Qp},$$

где:

X - эффективность топлива на данном объекте (1);

M - эффективность менеджмента (2);

It - индекс эффективности цифровизации (3);

Li – динамика уровня аварийности (%);

Qp - динамика тепловых потерь (%).

Выводы. На основании вышеизложенного сформулируем основные выводы исследования. Предложенная система показателей, а также интегральный показатель эффективности, на наш взгляд ясно показывает, что при увеличении аварийности или тепловых потерь общая эффективность объекта снижается, и требуется больше усилий по улучшению технико-экономических показателей, менеджмента или цифровизации, чтобы это компенсировать.

В целом же предложенный в статье подход позволяет:

- определять эффективность коммунального объекта, региона или группы объектов имея в распоряжении доступные, исчисляемые в натуральных величинах показатели;

- сравнивать объекты, функционирующие в различных регионах, на разных видах топлив по единым критериям;

- моделировать условия повышения энергоэффективности объекта исходя из переменных критериев, (например, варьируя расходную часть на внедрение новых технологий или обосновав переход на новые топлива);

- прогнозировать изменение эффективности объекта в результате его модернизации, слияния/поглощения предприятий коммунальной энергетики и других процессов трансформации, связанные с энергоэффективностью.

Будущие исследования авторов по данной тематике будут сфокусированы на практическом применении системы показателей, а также уточнении методики оценки эффективности объектов коммунальной энергетики.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ:

1. Чичканов, В. П. Методика оценки эффективности функционирования предприятий электроэнергетики в регионах России / В. П. Чичканов, А. В. Семиколонов // Социум и власть. – 2015. – № 3(53). – С. 108-112. – EDN UBFNIH.
2. Малкова, Т. Б. Модель принятия инвестиционных решений, способствующих развитию теплоснабжающих организаций с учётом ограничений, возникающих в условиях применения тарифов по методу «альтернативной котельной» / Т. Б. Малкова, Н. Г. Верстина, М. В. Гамм // Вестник университета. – 2023. – № 5. – С. 122-130. – DOI 10.26425/1816-4277-2023-5-122-130. – EDN UATTQK.
3. Астафьева, Е. Д. Модель выбора топлива для модернизации объектов ТЭК как необходимый элемент системы управления качеством производства тепловой энергии / Е. Д. Астафьева, М. А. Семенов, Р. В. Хаматаев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2011. – № 3(50). – С. 128-133. – EDN NPRLYJ.
4. Бездудная, А. Г. Экономическая оценка энергоэффективности на примере топливно-энергетического комплекса России / А. Г. Бездудная, М. Г. Трейман // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. – 2018. – № 4(112). – С. 75-80. – EDN QMQMLA.
5. Аванесов, Е. К. Системный подход к энергосбережению / Е. К. Аванесов, Г. Н. Иванова, Н. Е. Цымбал // Инновационные методы управления в области энергоэффективности. Внедрение международных стандартов в области энергоменеджмента: сб. ст. и докладов конф. – СПб.: Легаси, 2011. – С. 44-53.
6. Колыхаева, Ю. А. Комплексная оценка эффективности функционирования системы теплоснабжения / Ю. А. Колыхаева, К. Э. Филюшина // Проблемы современной экономики. – 2012. – № 1(41). – С. 322-325. – EDN PCGKSN.
7. Балахонов, С. Ю. Организационно-экономические модели и механизмы повышения эффективности теплоснабжения городских потребителей / С. Ю. Балахонов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2024. – Т. 16, № 1(61). – С. 139-150. – EDN GYUEBL.
8. Павлова, А. В. Цифровизация и цифровая трансформация теплоэнергетического комплекса / А. В. Павлова, Е. Ю. Головина // Системный анализ в проектировании и управлении: Сборник научных трудов XXVI Международной научно-практической конференции. В 3-х частях, Санкт-Петербург, 13–14 октября 2022 года. Том Часть 2. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2023. – С. 150-154. – DOI 10.18720/SPBPU/2/id23-91. – EDN IGHELE.
9. Соловьев, В. И. Цифровая трансформация систем теплоснабжения муниципального образования / В. И. Соловьев // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2019. – № 2(14). – С. 52-61. – DOI 10.25729/2413-0133-2019-2-05. – EDN IHIZKF.
10. Пекишева, А. А. Повышение эффективности и управления малыми котельными: Разработка системы диспетчеризации с использованием российского программного обеспечения / А. А. Пекишева // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2024. – № 5-4(92). – С. 31-36. – DOI 10.24412/2500-1000-2024-5-4-31-36. – EDN UVJQVI.

Поступила в редакцию 27.03.2025 г., рекомендована к печати 14.04.2025 г.

ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF THE MUNICIPAL ENERGY COMPLEX FACILITY

*Kostiuchenko I.V., Starykh A.V., **Liubskaya O.G.***

The article is devoted to the issue of efficiency assessment in relation to the facility of the municipal energy complex (IES). Based on research on energy efficiency, management, and digital transformation of CES, the authors develop a system of performance indicators in three areas: fuel efficiency, management efficiency, and digitalization efficiency. Additionally, the introduction of the results of statistical observations of the comparative accident rate and the level of heat losses is justified. The ratio of a set of performance indicators in three directions to the sum of statistical coefficients is proposed as an integral indicator. This approach makes it possible to simplify and standardize the calculation of the efficiency of CES enterprises according to measurable, objective, accessible criteria, and makes it possible to conduct comparative analysis both at the facility (enterprise) level and at the CES level of regions and the industry as a whole.

Keywords: municipal energy system, efficiency assessment, efficiency indicators, energy, fuel, digitalization.

Костюченко Ирина Валерьевна

аспирант кафедры энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности ФГБОУ ВО «Российский Государственный Университет им. А.Н. Косыгина»,
Российская Федерация, г. Москва.
E-mail: kostirina@mail.ru

Kostiuchenko Irina Valerevna

Postgraduate Student at the Department of Energy-Resource-Efficient Technologies, Industrial Ecology and Safety of Kosygin Russian State University, Russian Federation, Moscow.

Старых Андрей Владимирович

аспирант кафедры энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности ФГБОУ ВО «Российский Государственный Университет им. А.Н. Косыгина»,
Российская Федерация, г. Москва.
E-mail: mamirda@mail.ru

Starykh Andrei Vladimirovich

Postgraduate Student at the Department of Energy-Resource-Efficient Technologies, Industrial Ecology and Safety, Kosygin Russian State University, Russian Federation, Moscow.

Любская Ольга Геннадьевна

доктор медицинских наук, профессор кафедры энергоресурсоэффективных технологий, промышленной экологии и безопасности ФГБОУ ВО «Российский Государственный Университет им. А.Н. Косыгина»,
Российская Федерация, г. Москва.
E-mail: lyubskaya-og@rguk.ru

Liubskaya Olga Gennadevna

Doctor of Medical Sciences, Professor at Department of Energy-Resource-Efficient Technologies, Industrial Ecology and Safety, Kosygin Russian State University, Russian Federation, Moscow.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОВИЗОРА ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ ВОДОГРЕЙНОГО КОТЛА VITOMAX 200 - LW

© 2025 Бирюков А.Б., Сидоров В.А., Ошовская Е.В.

Представлен опыт использования тепловизоров для контроля и оценки технического состояния водогрейного котла.

Ключевые слова: котел, температура, тепловизор, диагностирование, техническое состояние, энергоэффективность.

Введение. Бесконтактное измерение температуры при помощи пирометра или тепловизора, благодаря развитию микроэлектроники стало доступным методом теплового диагностирования энергетических и теплотехнических объектов. Анализ полученных результатов позволяет принимать обоснованные решения по поддержанию или восстановлению работоспособного состояния теплового агрегата. В тоже время следует учитывать особенности режимов проведения измерений и условий эксплуатации объекта диагностирования.

Тепловой неразрушающий контроль котельного оборудования в XXI-ом веке проводится на высоком уровне благодаря использованию современных тепловизоров, подготовленным специалистам, отработанным методикам [1]. Инфракрасная диагностика применяется не только к теплоэнергетическому оборудованию [2], но рассматривается как универсальный способ контроля состояния различных объектов [3]. Данный метод используется для диагностирования трансформаторов [4], на металлургических предприятиях [5], электрооборудования [6].

В метрологическом плане исследуются вопросы точности измерения температуры с помощью тепловизора [7], влияние пыли на измерение температуры [8]. В работе [9] представлена математическая модель формирования тепловизионного изображения, полученная на основе законов термодинамики и геометрической оптики.

Вопросы оценки потенциальной опасности водогрейного котла стали предметом исследования в работе [10]. Относительно водогрейных котлов значительную роль играет термическое напыление покрытия в борьбе с горячей коррозией котельных труб [11], тепловая оптимизация для улучшения экологических показателей [12], внедрение ИИ для предотвращения аварий [13]. Широкое распространение тепловизоров позволяет рекомендовать их применение для решения оперативных вопросов функционирования водогрейных котлов в плане: оценки эффективности нагрева и энергоэффективности, зависимости температуры воздуха в помещении от изменения рабочих характеристик системы водяного отопления, частоты изменения температуры теплоносителя, поддержания тепловой устойчивости работы системы отопления и др. При этом предполагается привлечение специалистов непрошедших специального обучения, владеющих общими навыками применения тепловизора. Практика эксплуатации водогрейных котлов предполагает периодическое решение задач: сравнения эффективности выбранных режимов, общей оценки состояния без реализаций функций точного определения температуры и обоснованного обращения к знаниям квалифицированных специалистов.

В этом плане, наибольший интерес представляет работа [14], в которой рассматривается опыт применения тепловизора Fluke Ti 25 для мониторинга тепловых потерь котельной промышленного предприятия. Продолжением данной тематики является предлагаемая работа, выполненная на промышленном предприятии при единичном обследовании и направленная на определение особенностей использования тепловизора при диагностировании теплового состояния водогрейного котла VITOMAX 200-LW.

Основная часть. Водогрейный котёл (мощностью до 16,5 МВт) VITOMAX 200 - LW (рис. 1) нашёл широкое применение на промышленных и пищевых предприятиях для нагрева воды до температуры 60...80°C [15]. Работа системы автоматики, экономичность, надёжность при эксплуатации позволяют работать данному агрегату достаточно длительное время. В тоже время, при отсутствии резервирования повышаются риски полной остановки предприятия в случаях экстремальных ситуаций: отсутствие подачи топлива, прекращение подачи электрической энергии, внезапные отказы обеспечивающих элементов - горелок, вентилятора, насоса, элементов системы автоматики, предохранительных устройств, теплообменника и др. Фактически, на работоспособное состояние данного агрегата в равной степени влияют: внешние факторы (указанные выше); технологические условия эксплуатации (количество включений, уровень тепловой нагрузки); внутренние факторы (качество изоляции, наличие отложений и др.) и действия по техническому обслуживанию (промывка) и ремонту (текущий, капитальный) котла. При этом наблюдается следующая зависимость – чем раньше замечены отклонения в фактическом состоянии теплового агрегата, тем меньшие затраты необходимы для их устранения, что обеспечивает увеличение общего срока эксплуатации.

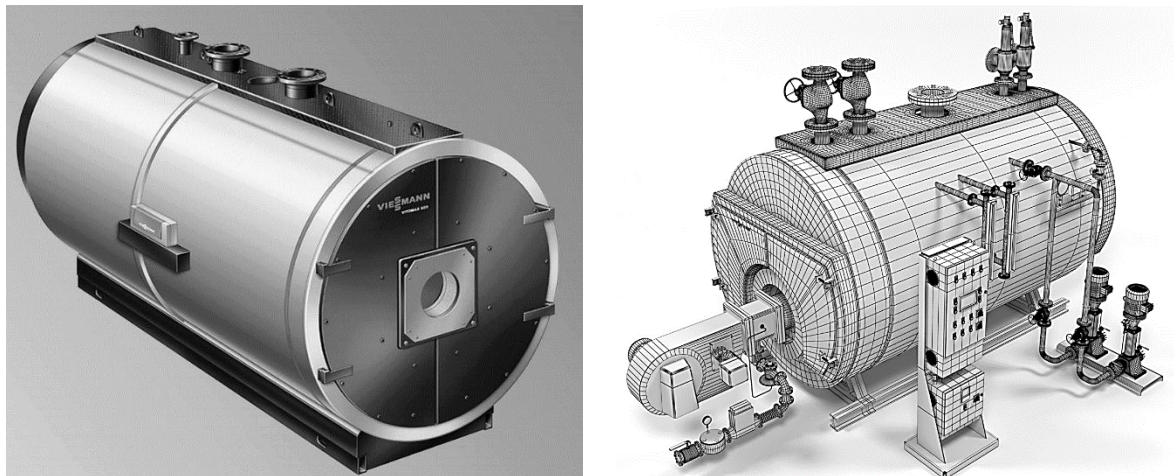


Рис. 1. Водогрейный котёл VITOMAX 200-LW – вид общий

Возможные причин внезапной остановки котла, разделяются на прогнозируемые и непрогнозируемые. Непрогнозируемые причины, обычно связанные с возникновением экстремальных ситуаций (отсутствие подачи топлива, прекращение подачи электрической энергии), требуют разработки соответствующих мероприятий и резервирования подачи энергии. Прогнозируемые – отказы обеспечивающих элементов (горелки, вентилятора, насоса, элементов системы автоматики), а также связанные с ухудшением состояния футеровки, износом водогрейных труб и др., предупреждаются проведением технического обслуживания и ремонта на основании данных диагностирования.

Особую роль при этом приобретает сочетание ежедневных осмотров органолептическими методами и периодического диагностирования с использованием приборных методов. Одним из признаков ухудшения технического состояния котла, как любого теплового агрегата, является износ футеровки и повышение потерь тепла. В правилах по эксплуатации котла указано, что ежегодно должен выполняться наружный контроль, а раз в 3 года - испытание давлением взамен внутреннего контроля. Представляется целесообразным дополнить данные требования рекомендацией теплового диагностирования с использованием тепловизора для контроля тепловых полей, путём визуализации инфракрасного излучения в спектральном диапазоне 7,5...14 мкм. При этом следует учитывать некоторые особенности, выявленные при контроле тепловых полей водогрейного котла VITOMAX 200 - LW.

Приборная реализация метода безконтактного теплового контроля, в настоящее время, представлена широким перечнем приборов с различными техническими характеристиками. В проведенном исследовании использовались тепловизор Testo 871 (поле зрения 35°×26°) и компактная система формирования тепловизионного изображения FLIR C2 (поле зрения 41°×31°). Задача сравнения возможностей указанных приборов не ставилась. Коэффициент излучения ϵ принят равным 0,95 при выполнении всех измерений. Это снижает точность определения фактической температуры, но обеспечивает относительное сравнение при оценке технического состояния. Безусловно, определение фактического коэффициента излучения отдельных элементов позволит повысить точность в постановке диагноза. Полученные данные следует дополнить результатами визуального осмотра, вибрационного контроля, анализа шумов механизма при комплексном диагностировании котла для принятия обоснованных решений.

В современной инженерной практике для наладки, контроля состояния и диагностирования теплотехнологического и других видов оборудования широкое применение находят тепловизоры. Однако, следует понимать, что даже для одного и того же агрегата механическое сравнение тепловизионных снимков одноименных элементов может приводить к неправильным выводам. Причина заключается в том, что значения температур и их распределение по поверхностям исследуемых элементов зависят от множества факторов. Применительно к котельному и вспомогательному оборудованию в этот перечень входят (тепловая нагрузка агрегата или расход прокачиваемой среды, температура среды на входе, температура в котельном зале, температура воздуха, идущего на горение и т.д.).

Методологические подходы к сравнению величин, характеризующих работу различных объектов или одного и того же объекта за разные промежутки времени применительно к вопросу, связанному с анализом энергоэффективности, очень тщательно проработаны в стандарте [16]. Одними из базовых понятий в данном стандарте являются линия энергопотребления и базовая линия энергопотребления.

Подобный методологический подход может быть применен для составления научной базы сбора и использования тепловизионных снимков элементов котельного и вспомогательного оборудования. При снятии тепловизионных снимков какого-либо элемента каждому снимку ассоциируется дата, температура наружного воздуха, температура в котельном цехе, тепловая нагрузка и другие значения факторов, которые могут оказывать влияние на тепловое состояние исследуемого элемента. В течение отопительного сезона, в котором оборудование находилось в исправном состоянии (базовый период), необходимо накопить базу тепловизионных снимков, выполняя их с определенной периодичностью. Далее снимки необходимо проклассифицировать по условиям эксплуатации (сочетаниям значений факторов, находящихся в определенных диапазонах).

При получении новых снимков в последующие периоды эксплуатации проводится их сравнение со снимками, сделанными в базовый период при аналогичных сочетаниях факторов. Повышение температур поверхностей оборудования говорит либо об ухудшении теплоизолирующих свойств конструкции, либо о неисправностях, связанных с повышением механического трения. Основными компонентами диагностического массива являются: температура наружного воздуха $t_{нар}$ и температура в помещении $t_{пом}$; температура воздуха на входе в горелку $t_{гор}$ и температура дымовых газов $t_{дым}$; разность температур воды на входе и выходе из котла Δt ; количество подаваемого воздуха $Q_{воз}$; расход нагретой воды $Q_{вод}$ и расход газа на отопление $Q_{газ}$.

Считая известными, калорийность природного газа, теплоёмкость воды и предполагая стабильными процессы теплообмена в системе в течении отопительного сезона, получаем возможность построить зависимость КПД агрегата от степени загруженности. Стабильность полученных зависимостей соответствует номинальным режимам работы, повышение тепловых потерь, сопротивления в сети приведёт к изменениям комплексных показателей.

Точками контроля могут быть отдельные точки на поверхности котла. Например, входной патрубок вентилятора со стороны передней поворотной камеры (рис. 2). Единичное измерение температуры в точке M1 (58,8 °C) не позволяет сделать однозначных выводов о состоянии. Сравнение данных значений позволит выявить сезонные колебания температуры, снижение подачи вентилятора, появление мест подсоса воздуха и др.

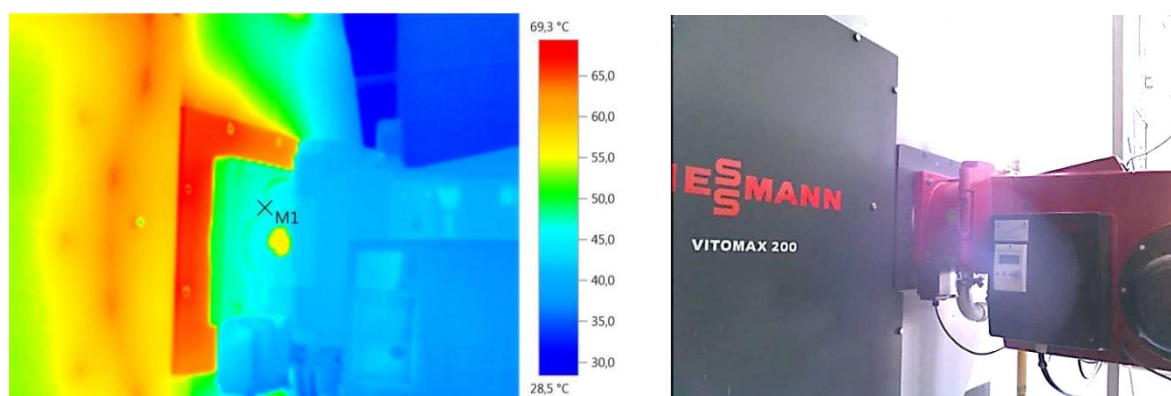


Рис. 2. Тепловая картина и визуальная локализация точки измерения на входном патрубке вентилятора со стороны передней поворотной камеры

Дополнительная точка контроля находится с противоположной стороны на торцевой поверхности котла (рис. 3) рядом с технологическим окном (красная точка на термограмме). Разность температур на поверхности котла и внутри, зафиксированная по температуре поверхности смотровых люков или выходящих трубопроводов (рис. 4), позволяет оценить качество теплоизолирующих свойств футеровки. Необходимо отметить, что температура боковой поверхности котла находится на уровне 30...36 °C, обеспечивая умеренные потери.

Особый интерес представляет крышка водоохлаждаемой передней поворотной камеры, одновременно включающая тепловые мостики с внутренним объёмом котла (несущие элементы петли – рис. 5а) и крепление футеровки крышки (рис. 5б). В данном случае появляется возможность использовать подход взаимного сравнения температуры однотипных элементов, разница температур которых не должна превышать 20 °C.

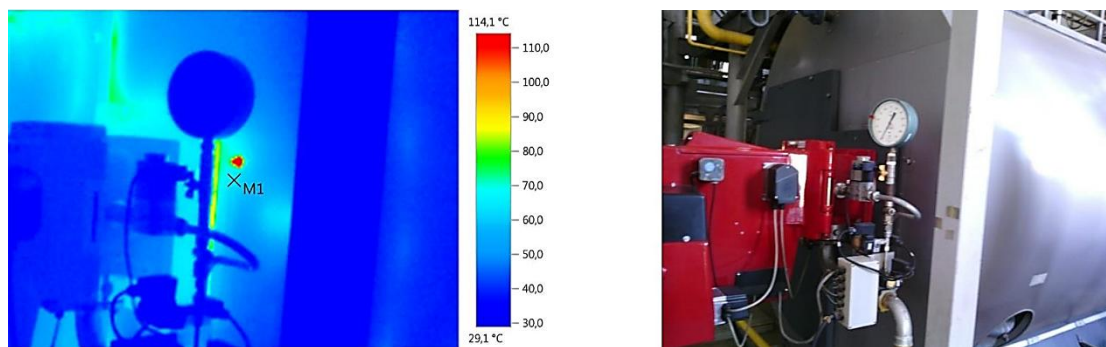


Рис. 3. Температура на торцевой поверхности котла – 45 °C

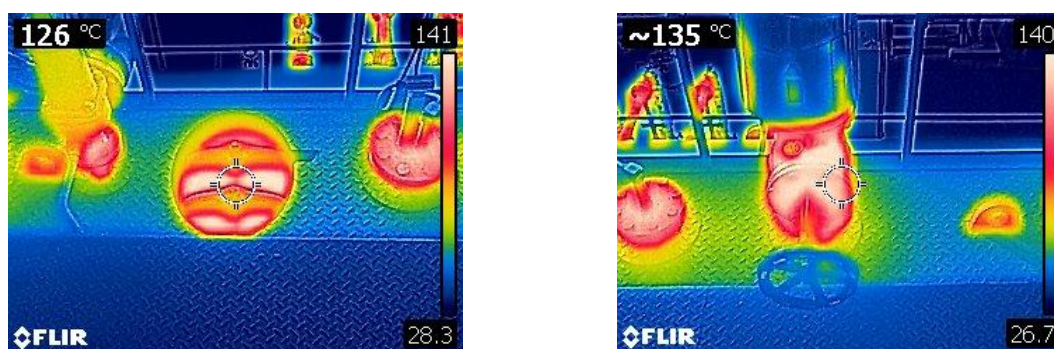
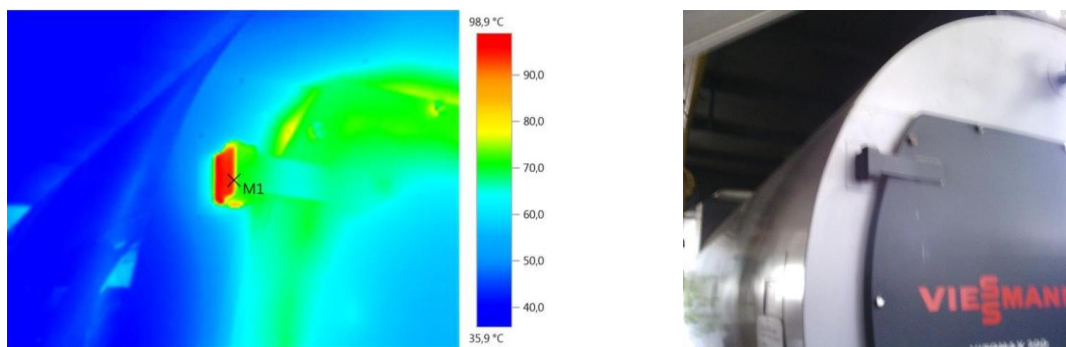
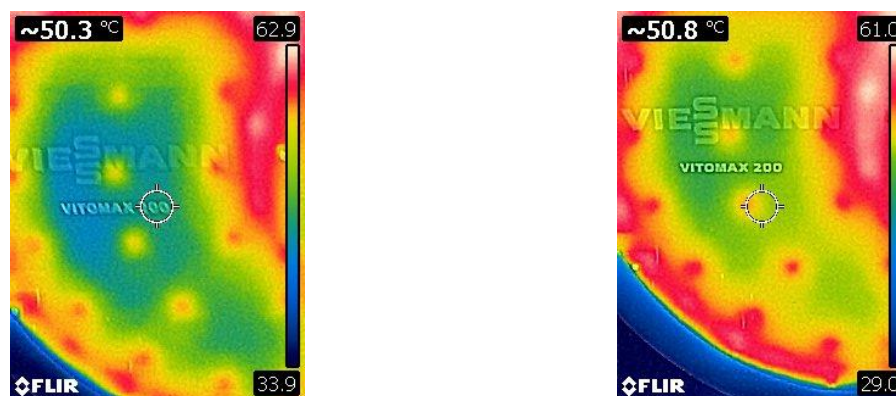


Рис. 4. Температура элементов котла (люка, фланца) без футеровки



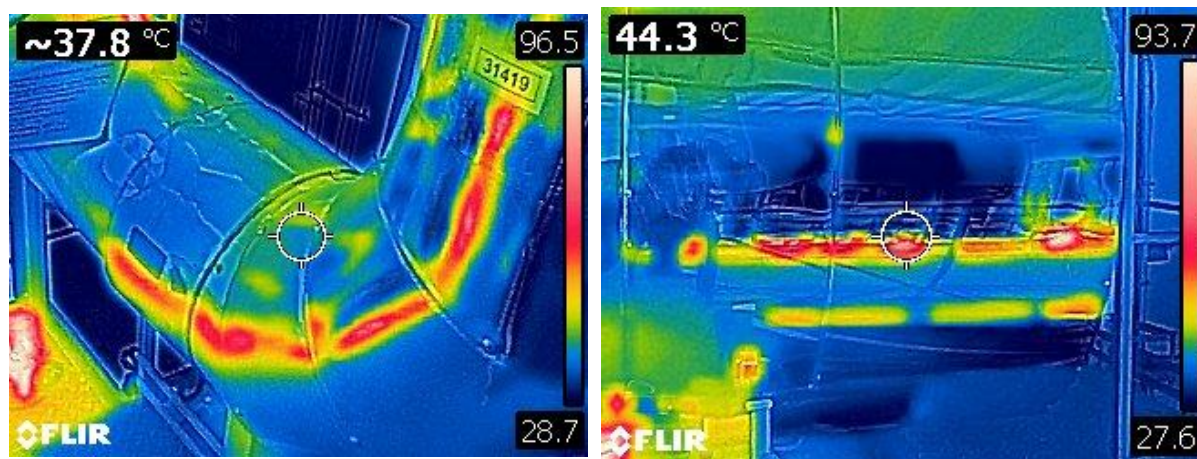
а)



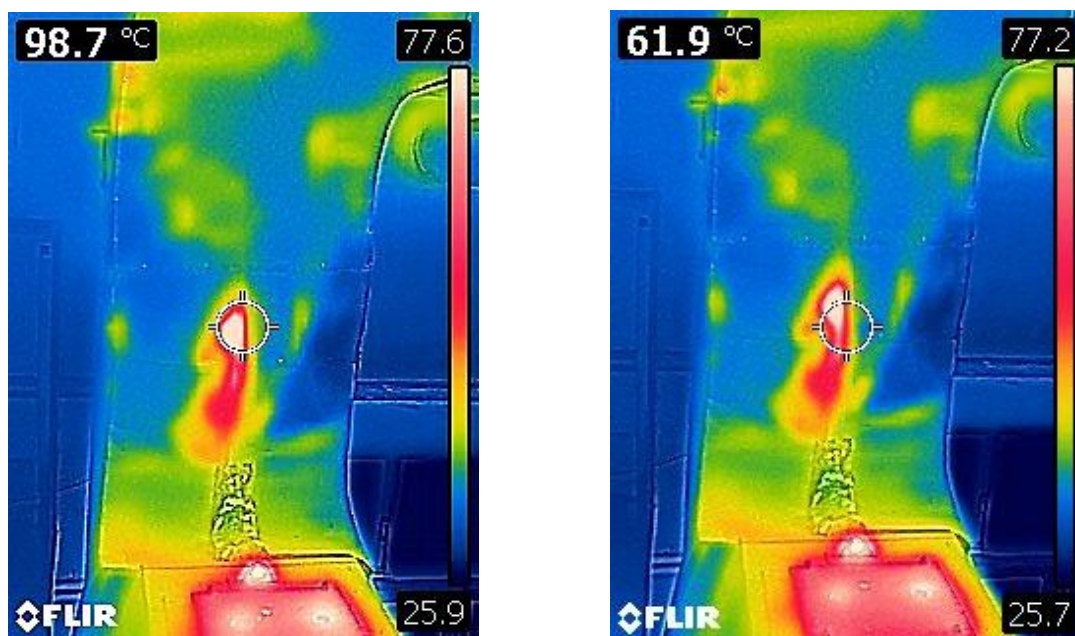
б)

Рис. 5. Температура элементов крышки водоохлаждаемой передней поворотной камеры:
а) несущий элемент петли; б) крепление футеровки крышки

Глянцевая поверхность внешней облицовки трубопроводов, дымоходов, теплообменников приводит к отражению инфракрасного излучения и возможным ошибкам при постановке диагноза. На рис. 6 приведены два примера облицовки с отражением нагретых до более высокой температуры элементов. Фактическая температура в данных зонах порядка 35...40 °С.



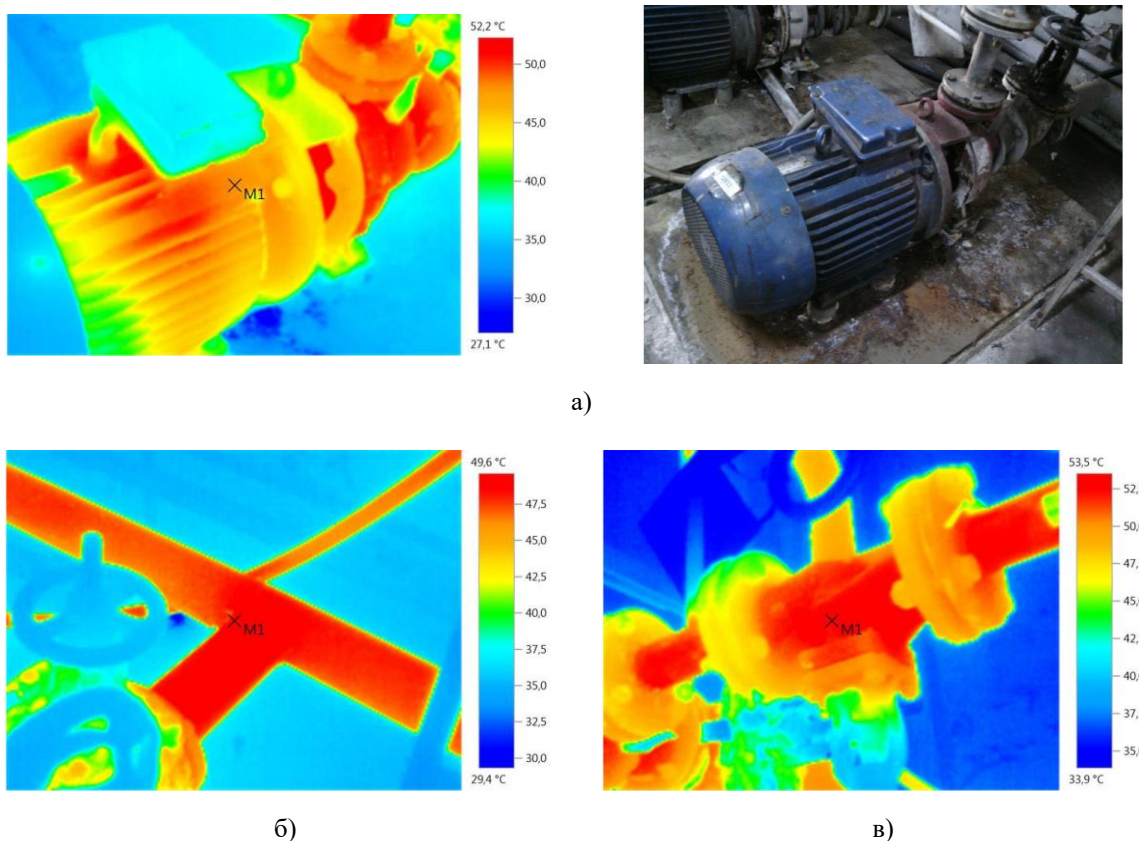
а)



б)

Рис. 6. Примеры отражения нагретых элементов на глянцевой поверхности футеровки:
а) трубопровода горячей воды; б) дымохода

Для насоса горячей воды дополнительным диагностическим параметром состояния, на ряду с традиционными - температурой корпуса и подшипников двигателя (рис. 7а), может быть разница температур всасывающего (рис. 7б) и нагнетающего трубопроводов (рис. 7в). Полученная, в данном примере, разница $52,8 - 48,9 = 3,9$ °С может быть следствием кавитации, воздействия механической энергии при вращении рабочего колеса, повышения температуры из-за механического контакта вращающихся и неподвижных деталей и др. Этот результат возможно использовать в качестве «эталонного» значения при относительном сравнении показателей состояния насоса.



б)

в)

Рис. 7. Тепловая картина насоса горячей воды:

а) тепловая картина и общий вид двигателя насоса;

б) термограмма всасывающего трубопровода (в точке М1 температура 48,9 °С);

в) термограмма нагнетающего трубопровода (в точке М1 температура 52,8 °С)

Важным применением результатов тепловизионного контроля поверхности корпуса котельного агрегата является их использование в процедуре идентификации КПД котельного агрегата по методу обратного баланса.

Для котельного агрегата, работающего на газообразном топливе, коэффициент полезного действия может быть идентифицирован как:

$$\eta = q_1 = 1 - q_2 q_3 q_5,$$

где q_2 , q_3 , q_5 – относительные потери теплоты с уходящими газами, от химического недожога топлива и теплопередачей через ограждающую конструкцию.

Величина q_5 определяется как:

$$q_5 = \frac{F_k \cdot k \cdot (t_{\text{пов}} - t_{\text{ос}})}{V_T Q_{\text{нр}}},$$

где F_k – площадь ограждающей конструкции котельного агрегата, м²;

k – средний коэффициент теплопередачи, характеризующий теплопотери котельного агрегата, Вт/(м²·К);

$t_{\text{пов}}$ – среднеинтегральное значение температуры наружной поверхности ограждающей конструкции котельного агрегата, °С;

$t_{\text{ос}}$ – температура воздуха в котельном зале, °С;

V_T – расход топлива, м³/с;

$Q_{\text{нр}}$ – теплота сгорания топлива, Дж/м³.

Выводы. Таким образом, использование тепловизоров для получения информации о температурных полях элементов водогрейных котлов позволяет оперативно контролировать их техническое состояние, а также выполнять оценку энергоэффективности при условии неизменных режимов измерения в установленных контрольных точках, при сопоставимых условиях и режимах эксплуатации объекта диагностирования, учёта индивидуальных особенностей теплового агрегата.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сайт компании ПЕРГАМ [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.pergam.ru/diagnostika/obsledovanie-kotelnyh/> (дата обращения 11.02.2024).
2. Инфракрасная диагностика теплоэнергетического оборудования / Н. Л. Михайлова, Н. С. Черников, Д. А. Логваль [и др.] // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2016. – № 1-2. – С. 103-105.
3. Тюлюканов, В. Д. Тепловизионная диагностика как универсальный способ контроля состояния различных объектов / В. Д. Тюлюканов // Новости теплоснабжения. – 2010. – № 3 (115). – 5 с.
4. Димитрюк, К. А. Тепловизионный метод технической диагностики трансформаторов 110 КВ / К. А. Димитрюк // Вестник науки. – 2023. – Т. 4, № 7(64). – С. 337-342. – EDN IPTBZM.
5. К использованию тепловизоров в решении актуальных задач теплофизики на металлургическом предприятии / Н. Н. Иванов, С. А. Сыромятников, Е. А. Иванова, А. В. Медведев // Безопасность труда в промышленности. – 2021. – № 5. – С. 7-12. – DOI 10.24000/0409-2961-2021-5-7-12. – EDN IFFWUZ.
6. Xu, Q. A Diagnosis Method for Electrical Equipment Overheating Fault Based on Mean Shift Algorithm / Q. Xu, J. Pan, J. Ning // Intelligent Computing Technology and Automation. – 2024. – P. 333-340. – DOI 10.3233/ATDE231205.
7. Прошкин, С. С. К вопросу о точности измерения температуры с помощью тепловизора / С. С. Прошкин // Вестник Международной академии холода. – 2014. – №1. – С. 51-54.
8. Influence of Dust on Temperature Measurement Using Infrared Thermal Imager / D. Pan, Z. Jiang, W. Gui, [et al.] // IEEE Sensors Journal. – 2020. – V. 20. – № 6. – P. 2911-2918. – DOI 10.1109/JSEN.2019.2957064.
9. Кучерин, П. Н. Математическое моделирование тепловизионных изображений объектов / П. Н. Кучерин, А. В. Лопин, О. Ю. Макаров // Вестник ВГТУ. – 2010. – №11. – С. 39-42.
10. Hazard assessment of hot water boiler at thermal power plant / V. Gordeev, E. Nasyrova, A. Elizaryev, A. Fazylova // E3S Web of Conferences 402 (1). – 2023. – DOI 10.1051/e3sconf/202340207041.
11. The Role of Thermal Spray Coating to Combat Hot corrosion of Boiler Tubes: A Study Assistant settings / S. Kumar, R. Kumar, S. Singh, [et al.] // Journal of Xidian University. – 2020. – № 5. – P. 229-239. – DOI10.37896/jxu14.5/024.
12. Ciupek, B. Review of Thermal Calculation Methods for Boilers - Perspectives on Thermal Optimization for Improving Ecological Parameters / B. Ciupek, A. Frackowiak // Energies. – 2024. – V. 17. – P. 6380. –DOI 10.3390/en17246380.
13. Ismail, F. B. Ai adoption for steam boiler trip prevention in thermal power plants / F.B. Ismail, H.H. Al-Kayiem, H. A. Kazem // International journal of energy production and management. – 2024. – V .9. – № 3. – P. 131-142. – DOI 10.18280/ijepm.090302.
14. Смирнов, В. Д. Опыт применения тепловизора Fluke Ti 25 для мониторинга тепловых потерь технологической котельной промышленного предприятия / В. Д. Смирнов, И. П. Аистов // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность. – 2015. – №3. – С. 176-180.
15. VITOMAX 200-LW. Водогрейный котёл с допустимой температурой подачи до 120 °С. Технический паспорт [Электронный ресурс]. – URL: https://vito.nt-rt.ru/images/manuals/vitomax_200_lw_m62a_ps.pdf (дата обращения 11.02.2024).
16. ГОСТ Р ИСО 50001-2023. Системы энергетического менеджмента. Требования и руководство по применению: национальный стандарт Российской Федерации: введен 2023-06-01. – М.: Российский институт стандартизации, 2023 – 29 с.

Поступила в редакцию 01.04.2025 г., рекомендована к печати 15.04.2025 г.

USE OF THERMAL IMAGER IN THE DIAGNOSTICS OF A WATER HEATING BOILER
VITOMAX 200 - LW

Biriukov A.B., Sidorov V.A., Oshovskaia E.V.

The experience of using thermal imagers for monitoring and assessing the technical state of a water heating boiler is presented.

Keywords: boiler, temperature, thermal imager, diagnostics, technical state, energy efficiency.

Бирюков Алексей Борисович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической теплофизики, проректор ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: birukov.ttf@gmail.com

Biriukov Aleksei Borisovich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technical Thermophysics, Vice-rector of Donetsk National Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Сидоров Владимир Анатольевич

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры механического оборудования заводов черной металлургии им. В.Я. Седуша ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: sidorov_va58@mail.ru

Sidorov Vladimir Anatol'evich

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Mechanical Equipment of Ferrous Metallurgy Plants named after V.Ya. Sedush of Donetsk National Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

Ошовская Елена Владимировна

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механического оборудования заводов черной металлургии им. В.Я. Седуша ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: evo2008@bk.ru

Oshovskaya Elena Vladimirovna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mechanical Equipment of Ferrous Metallurgy Plants named after V.Ya. Sedush of Donetsk National Technical University,
Russian Federation, DPR, Donetsk.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ГИБАХ КИПЯТИЛЬНЫХ ТРУБ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ПРЯМОТОЧНЫХ КОТЛОВ- УТИЛИЗАТОРОВ

© 2025 Яковлев П.В., Андреев В.В., Пискунов В.М.

Опыт эксплуатации ПГУ с прямоточными котлами-утилизаторами выявил проблему разрушения труб в местах их изгиба. Проблема обусловлена движением пара и жидкости с высокой скоростью. Значительные динамические нагрузки на внутренней поверхности трубы вызывают эрозионный износ с последующим разрушением стенки трубы. Управление движением потока для снижения касательных напряжений на внутренней поверхности являются целью настоящего исследования. Для решения проблемы предложено изменить геометрию трубного пучка с применением сложной траектории изгиба. Сравнительный анализ выполнен для поворота трубы на 180° с постоянным радиусом, прогрессивным радиусом кривизны и плавным входом с увеличенным радиусом кривизны при одинаковом шаге пучка труб.

Ключевые слова: моделирование, прямоточный котёл, надёжность.

Введение. Применение прямоточных котлов в парогазовых установках потребовало разработки мер по повышению их надёжности. Так, если в классических паровых котлах наибольшее число аварий приходится на наиболее теплонапряжённые элементы – экранные трубы и пароперегреватели, то в прямоточных котлах особого внимания потребовали узлы, подверженные эрозионному износу. Опыт эксплуатации показал, что до 40% аварий приходится на повреждения труб испарительных контуров низкого давления в зонах изменения направления движения потоков – отводах [1]. На рисунке 1 показан характер повреждения, представляющий собой типичный эрозионный износ, вызванный высокоскоростным парожидкостным потоком.



Рис. 1. Характерный вид повреждения трубопровода испарителя низкого давления в зоне отвода [1]

Как видно из формы повреждений, отверстия вытянутой формы и совпадают с направлением потока. Очевидно, что повреждения локализованы в зонах изменения направления его траектории. Исходя из того, что первопричиной является изменение вектора скорости с последующим соударением капель жидкости со стенкой, решением проблемы может быть изменение геометрии отвода.

Целью работы является повышение надёжности утилизационных прямооточных котлов ПГУ. Исходя из причины снижения надёжности элемента, основной задачей исследования стало определение влияния радиусагиба трубы в зоне отвода при заданном шаге трубного пучка на структуру потока жидкости и разработка рекомендаций по изменению геометрии отводов для минимизации эрозионного износа.

В качестве метода исследования выбран метод численного моделирования, в основе которого лежат осреднённые по Рейнольдсу дифференциальные уравнения Навье-Стокса и сплошности [2]. Этот метод реализован в программном пакете SolidWorks Flow Simulation. Как наиболее соответствующая условиям задачи, выбрана модель турбулентности $k-\epsilon$.

Расчёт выполнен для стационарного процесса со следующими граничными условиями: на входе в отвод задана скорость потока, на выходе из отвода, для обеспечения сходимости решения, задавалось давление. Разбиение области течения выполнялось автоматически с адаптацией сетки. Для корректного сравнения полученных результатов модель включает все рассмотренные варианты исполнения отводов с одинаковыми граничными условиями, расчёт для которых выполняется и анализируется одновременно.

Результаты исследования. Исследование выполнялось методом численного моделирования [2-6]. Геометрическая модель представлена на рис. 2. Было предложено два варианта изменения геометрии отвода. Первый вариант заключался в прогрессивном изменении радиуса трубы с плавным изменением радиусагиба с его минимальным значением при угле поворота потока на 90° . Следует отметить, что из-за требования сохранения шага трубного пучка радиусгиба в верхней точке был меньше радиусагиба при постоянном радиусе. Второй рассмотренный вариант предполагал увеличение радиуса за счёт начальногогиба в сторону, противоположную отводу, гиб с увеличенным радиусом и компенсацию увеличения шагагибом симметричным начальному. Для корректного сравнения модель дополнена стандартным отводом с постоянным радиусомгиба. Во всех трёх отводах заданы одинаковые граничные условия. Количественно, во второй модели радиусгиба в верхней точке меньше первого варианта в 1,5 раза, соответственно в третьей модели радиус увеличен в 1,5 раза. Для исключения локальной турбулизации потока сопряжение поверхности труб выбрано по касательным.

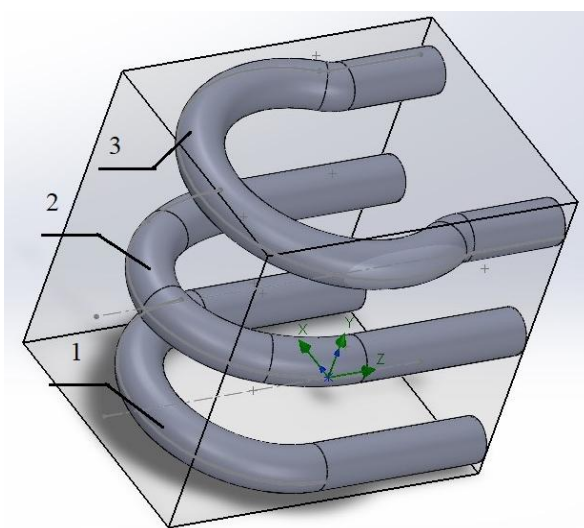


Рис. 2. Модели отвода: 1- отвод с постоянным радиусомгиба; 2 – прогрессивный радиусгиба; 3 – отвод с увеличенным радиусомгиба

Расчёт поля давления на внутренней поверхности отводов (рис. 3) для всех вариантов показал локальный его рост по внешней образующей вблизи центрагиба. Сравнивая отвод с постоянным радиусомгиба, можно заметить, что в первом варианте, в области минимального радиуса, давление больше. Плавный вход жидкости с относительно малым давлением сопровождается увеличением кривизны поверхности отвода с локальным повышением давления (рис. 3, поз. 2). Для варианта с большим радиусом кривизны (рис. 3, поз. 3) характерно меньшее значение давления.

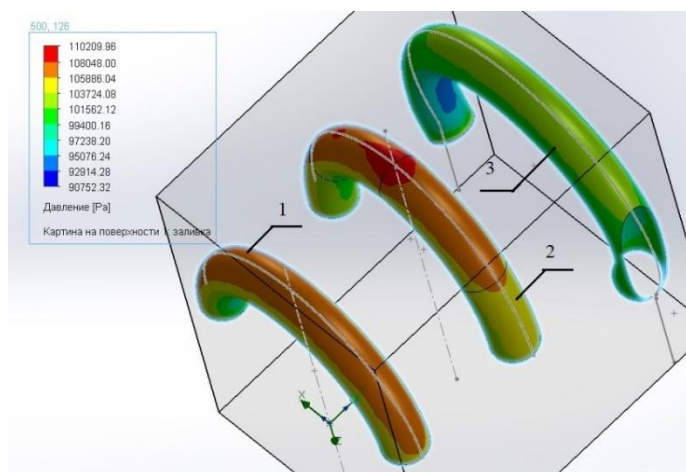


Рис. 3. Распределение давления по внутренней поверхности отвода: 1- отвод с постоянным радиусомгиба; 2 – прогрессивный радиусгиба; 3 – отвод с увеличенным радиусомгиба

График изменения давления по внешней образующей поверхности трубы представлен на рис. 4. Варианты 1 и 2 показывают сопоставимые давления кроме участка с локальным уменьшением радиусагиба в варианте 2. Рост давления наблюдается в зоне риска эрозионного износа. В третьем варианте избыточное давление относительно статического меньше примерно в 3 раза.

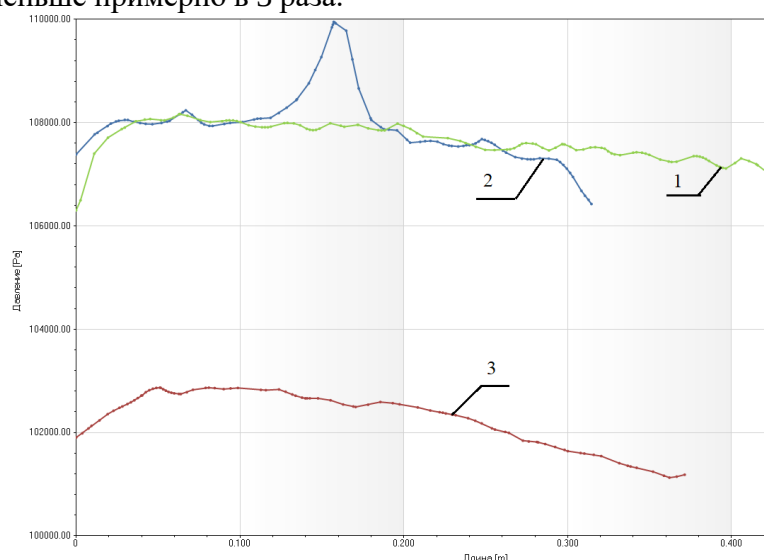


Рис. 4. График изменения давления на внешней образующей поверхности отвода: 1- отвод с постоянным радиусомгиба; 2 – прогрессивный радиусгиба; 3 – отвод с увеличенным радиусомгиба

Для анализа состояния потока жидкости и его взаимодействия со стенкой представляет интерес поле завихрённости потока. В варианте с большим радиусом кривизны (рис. 5, поз. 3) завихрённость заметно больше.

Представляется, что завихрению потока способствует двукратное изменение направление движения жидкости: на входе в сторону, противоположную отводу, а затем по направлению поворота. Учитывая, что износ поверхности вызван соударением капель жидкости, разгоняемых потоком, вихреобразование должно препятствовать направленному движению капель.

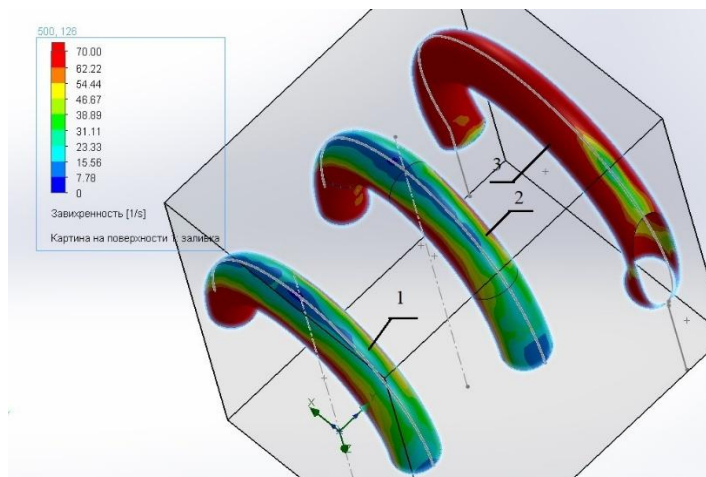


Рис. 5. Завихрённость потока на поверхности отвода: 1- отвод с постоянным радиусомгиба; 2 – прогрессивный радиусгиба; 3 – отвод с увеличенным радиусомгиба

Учитывая, что взаимодействие потока во многом определяется параметрами пограничного слоя, сравнение вариантов производилось и по этому параметру. На рис. 6 представлен график изменения толщины пограничного слоя. Анализ состояния пограничного слоя показал, что по направлению движения жидкости толщина пограничного слоя возрастает. При постоянном радиусегиба это практически монотонная зависимость, для прогрессивногогиба зависимость более сложная, но в целом характерная для движения жидкости вдоль поверхности. Прогнозируемо, что капли жидкости в этом потоке будут отбрасываться центробежными силами к поверхности отвода.

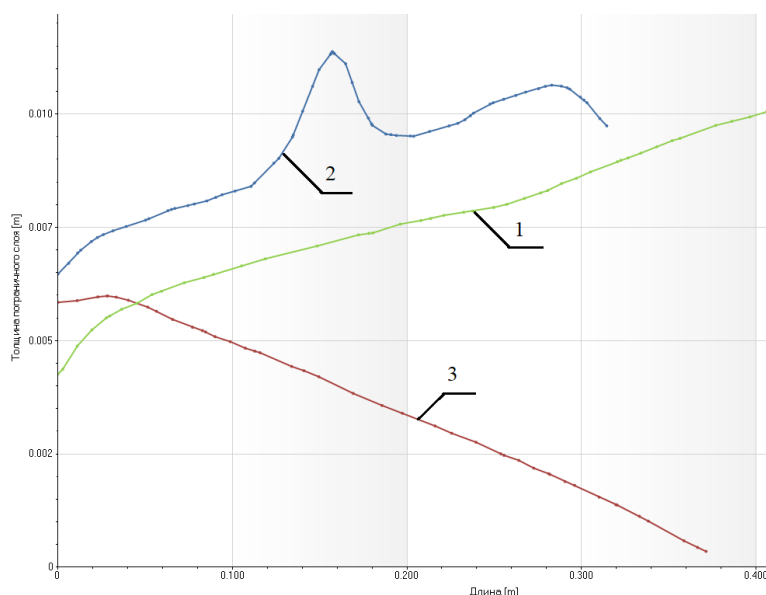


Рис. 6. Толщина пограничного слоя на внешней образующей поверхности отвода: 1- отвод с постоянным радиусомгиба; 2 – прогрессивный радиусгиба; 3 – отвод с увеличенным радиусомгиба

В третьем варианте толщина пограничный слой размывается, что говорит о переменном по направлению движении среды. Отсутствие направленного вектора скорости позволяет ожидать рассеивание капель жидкости и снижение уровня абразивного износа.

Выводы. Анализ полученных данных о движении пара в отводах с различным геометрическим исполнением гибов трубы в испарительных контурах низкого давления свидетельствует о возможности снижения степени их абразивного износа изменением конструкции отводов. Учитывая значительное влияние на абразивный износ радиусагиба отвода и сравнительный анализ различных его вариантов, можно рекомендовать применение увеличения радиуса за счёт начальногогиба в сторону, противоположную отводу с дальнейшим гибом трубы с увеличенным радиусом и компенсацией увеличения шага гибом симметричным начальному.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Проблемы эксплуатации котлов-утилизаторов парогазовых установок. Международная научно-техническая конференция, 26–27 апреля 2018 г.: сб. докл. / под общ. ред. докторов техн. наук А.Н. Тугова и Ю.А. Радина. – М.: ОАО «ВТИ», 2018. – 180 с.
2. Кутателадзе, С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие / С. С. Кутателадзе. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.
3. Белоусов, В. В. Принципы повышения интенсивности тепломассообмена в жидких средах дуговых многоэлектродных печей / В. В. Белоусов, А. Л. Кухарев // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2018. – № 2. – С. 57-67. – EDN PPAQQZ.
4. Золотарева, И. А. Влияние температуры на величину снижения гидродинамического сопротивления турбулентного трения в растворах ВМП и МПАВ / И. А. Золотарева, А. П. Симоненко, Т. К. Гучмазова // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2019. – № 3. – С. 58-64. – EDN FXOINZ.
5. Математическое описание гидродинамических параметров эрлифтного биореактора-осветлителя / В. И. Нездойминов, Н. Н. Голоденко, Д. В. Заворотный, О. В. Майстренко // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2020. – № 1. – С. 84-96. – EDN JNVHZZ.
6. Сторожев, С. В. Нечетко-множественная методика оценивания некоторых характеристик функционирования центробежно-струйных форсунок в технических системах термостабилизации / С. В. Сторожев, Ш. Нгуен-Куок, Б. Л. Х. Чан // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2019. – № 4. – С. 50-66. – EDN KDRXKH.

Поступила в редакцию 01.04.2025 г., рекомендована к печати 16.04.2025 г.

MODELING OF COOLANT MOVEMENT IN LOW-PRESSURE BOILING PIPES BENDS OF RIGHT-OF-FLOW WASTE-RECOVERY BOILERS

IAkovlev P.V., Andreev V.V., Piskunov V.M.

The experience of operating a combined-cycle plant with once-through waste heat boilers revealed the problem of tube failure at their bends. The problem is caused by the high-speed movement of steam and liquid. Significant dynamic loads on the inner surface of the tube cause erosive wear followed by tube wall failure. The objective of this study is to control the flow motion to reduce tangential stresses on the inner surface. To solve the problem, it is proposed to change the tube bundle geometry using a complex bending trajectory. A comparative analysis is performed for a 180° tube turn with a constant radius, a progressive radius of curvature, and a smooth entry with an increased radius of curvature at the same tube bundle pitch.

Keywords: modeling, direct-flow boiler, reliability.

Яковлев Павел Викторович

доктор технических наук, профессор кафедры теплотехники и теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»,
Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
E-mail: yakovlev_pv@pers.spmi.ru

IAkovlev Pavel Viktorovich

Doctor of Technical Sciences, Professor at Department of Thermal Engineering and Thermal Power Engineering of St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II,
Russian Federation, Saint-Petersburg.

Андреев Валерий Витальевич

кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники и теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»,
Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
E-mail: Andreev_VV@pers.spmi.ru

Andreev Valerii Vitalevich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Thermal Engineering and Thermal Power Engineering of St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II,
Russian Federation, Saint-Petersburg.

Пискунов Владимир Маркович

кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники и теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»,
Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
E-mail: Piskunov_VM@pers.spmi.ru

Piskunov Vladimir Markovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Thermal Engineering and Thermal Power Engineering of St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II,
Russian Federation, Saint-Petersburg.

ФИЗТЕХУ – 60

НАЧАЛО: 1965 г.

Постановлением Совета Министров Союза Советских Социалистических Республик № 421 от 28 мая 1965 г. за подписью Председателя А.А. Косыгина на базе Донецкого филиала Харьковского государственного университета им. М. Горького организован Донецкий государственный университет.

Далее Приказом Министерства высшего и среднего специального образования УССР № 410 от 07 июля 1965 г. за подписью Министра Ю.Н. Даденкова во исполнение Постановления Совета Министров УССР № 572 от 11 июня 1965 г. организован Донецкий государственный университет в составе из 6 факультетов, в т. ч. Физический.

Первым деканом факультета стал доцент КОСАЧЕВСКИЙ Леонид Яковлевич. Изначально в составе Физического факультета было 3 кафедры:

- кафедра экспериментальной физики (ЭФ) - перешла из филиала, под руководством заведующего кафедрой доцента ИГНАТЕНКО Петра Ивановича;

- кафедра физической гидродинамики (ФГД) - организована член-корреспондентом АН УССР ПОВХОМ Иваном Лукичом, работавшем ранее в ДонНИИ ЧерМет и по совместительству в филиале;

- кафедра низких температур и радиофизических методов исследований (НТиРФМИ) - организована академиком АН УССР ГАЛКИНЫМ Александром Александровичем, директором также вновь созданного в 1965 г. Донецкого физико-технического института АН УССР.



КОСАЧЕВСКИЙ
Леонид Яковлевич
(декан с 1965 по 1966 гг.)

Основная информация исторического характера взята из статьи декана физического факультета с 1995 по 2006 гг., доктора физико-математических наук, профессора Милославского Александра Григорьевича, посвященной 55-летию факультета «Нам - 55» [1].



ИГНАТЕНКО
Петр Иванович



ПОВХ
Иван Лукич

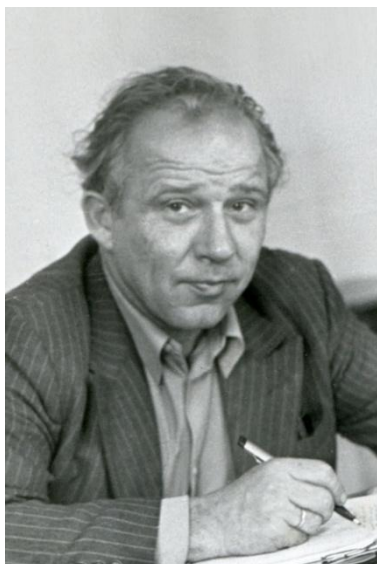


ГАЛКИН
Александр Александрович

Основатели Физического факультета и его первых кафедр в 1965 г.

ПЕРИОД СТАНОВЛЕНИЯ: 1966–1975 гг.

Последующие 10 лет действительно были периодом, когда факультет «строился», периодом поисков, проб и ошибок. С точки зрения статистики за этот период успели поработать 6 деканов: Петренко Ю.А., Ковтун Н.М., Шульга В.Г., Повх И.Л., Конев В.Н., Арыдин В.М.



ПЕТРЕНКО
Юрий Александрович
(декан с 1966 по 1967 гг.)



КОВТУН
Николай Моисеевич
(декан с 1967 по 1969 гг.,
основатель кафедры
ЭРТиРС в 1968 г.)



ШУЛЬГА
Владимир Гаврилович
(декан с 1969 по 1971 гг.)



ПОВХ

Иван Лукич
(декан с 1971 по 1972 гг.,
основатель кафедры
ФГД в 1965 г.)



КОНЕВ

Виталий Николаевич
(декан с 1972 по 1973 гг.)



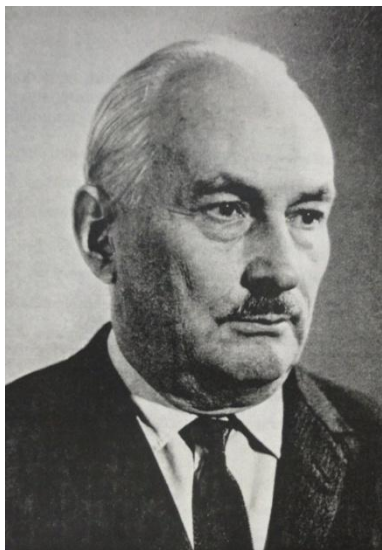
АРЫДИН

Василий Михайлович
(декан с 1973 по 1975 гг.,
основатель кафедры
ОФиМПФ в 1974 г.)

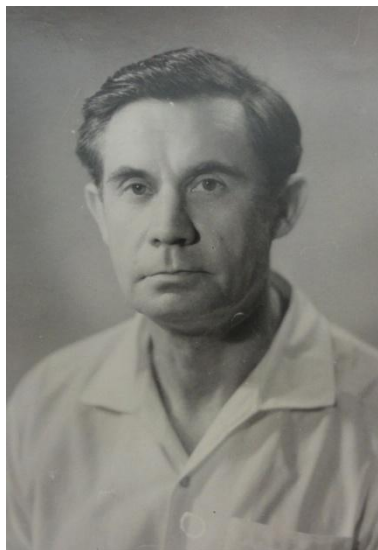
Усилиями руководства Донецкого физико-технического института АН СССР и Донецкого государственного университета шел процесс совершенствования и создания новых кафедр. Так, в рассматриваемом периоде были основаны кафедры рентгенометаллофизики (РМФ) под руководством академика АН СССР Архарова В.И., теоретической физики (ТФ) под руководством член-корреспондента АН СССР Толпыго К.Б., электрорадиотехники и радиоспектроскопии (ЭРТиРС) под руководством доцента Ковтуна Н.М., биофизики (БФ) под руководством профессора Боргардта А.А., технических средств и систем управления (ТССУ) под руководством профессора Тимошенко Г.М., общей физики и методики преподавания физики (ОФиМПФ) под руководством доцента Арыдина В.М., математической физики (МФ) под руководством доцента Бородина М.А.

При этом самой стабильной, и можно сказать факультетообразующей, оставалась кафедра ФГД, благодаря энергии, активности и широте научных интересов ее заведующего Повха И.Л.

Кроме того, переход к периоду стабильности связан еще и с сформировавшимися научными направлениями кафедр, большими наборами студентов и главенствующей ролью двух специальностей «Физика» и «Радиофизика», в подготовке студентов которых были задействованы все кафедры.



АРХАРОВ
Владимир Иванович
(основатель кафедры
РМФ в 1966 г.)



ТОЛПЫГО
Кирилл Борисович
(основатель кафедры
ТФ в 1966 г.)



БОРГАРДТ
Александр Александрович
(основатель кафедры
БФ в 1969 г.)



ТИМОШЕНКО
Григорий Маркович
(основатель кафедры
ТССУ в 1972 г.)



БОРОДИН
Михаил Алексеевич
(основатель кафедры
МФ в 1975 г.)



ШЕПИЛОВ
Николай Александрович
(декан с 1975 по 1983 гг.)

Кафедра БФ, к сожалению, просуществовала всего 3 года. Таким образом, к концу 1975 г. на факультете устоялись 9 кафедр: ЭФ - зав. каф. Яр-Мухамедов, ФГД - зав. каф. Повх И.Л., НТиРФМИ - зав. каф. Самсоненко Н.Д., РМФ - зав. каф. Игнатенко П.И., ТФ - зав. каф. Косачевский Л.Я., ЭРТиРС - зав. каф. Шульга В.Г., ТССУ - зав. каф. Мирошниченко В.В., ОФиМПФ - зав. каф. Арыдин В.М., МФ - зав. каф. Бородин М.А., а деканом факультета назначается доцент Шепилов Николай Александрович.

ПЕРИОД СТАБИЛЬНОСТИ: 1976–2014 гг.

Практически за 40 лет на факультете сменилось всего 5 деканов: Шепилов Н.А., Степко М.Ф., Ступин А.Б., Милославский А.Г., Каргин А.А. Для факультета это признак очень стабильной работы.



СТЕПКО

Михаил Филимонович
(декан с 1983 по 1986 гг.)



СТУПИН

Александр Борисович
(декан с 1986 по 1995 гг.)

Одним из важнейших принципов организации научной работы на факультете стало объединение фундаментальных и прикладных исследований, тесная связь между ними. Фундаментальные, теоретические и поисковые исследования финансировались из госбюджета, а прикладные разработки для предприятий и организаций осуществлялись за счет хозяйственных договоров.

Возрастание объемов исследований и внедрение их результатов привели к открытию в 1980 г. специализированного конструкторско-технологического бюро «Турбулентность» (СКТБ). Следующим шагом в этом направлении стала организация учебно-научно-производственного объединения, в которое вошли кафедра ФГД, СКТБ и проблемная лаборатория «Физические методы исследования турбулентности», в котором работало около 400 сотрудников. В 1991 г. был организован отдел «Физики магнитных явлений и высокотемпературной сверхпроводимости».



МИЛОСЛАВСКИЙ
Александр Григорьевич
(декан с 1995 по 2006 гг.)



КАРГИН
Анатолий Алексеевич
(декан с 2006 по 2014 гг.)

На начало нового тысячелетия факультет осуществляет подготовку бакалавров, специалистов и магистров по всем специальностям и на всех кафедрах. Все кафедры оснащены компьютерной и вычислительной техникой. Учебными и научными базами факультета традиционно выступают Донецкий физико-технический институт, Научно-исследовательский институт комплексной автоматизации и Донецкий государственный центр метрологии, стандартизации и сертификации. Остепененность преподавательского состава факультета – 21 % доктора и 44 % кандидаты наук.

11 сентября 2000 года Донецкому государственному университету присвоен статус национального университета, что соответственно привело и к его переименованию. За четыре десятилетия на кафедрах факультета тоже происходили изменения, в т.ч. и в связи с открытием новых актуальных специальностей. Так, кафедра ФГД стала кафедрой физики неравновесных процессов, метрологии и экологии (ФНПМиЭ). Кафедры НТиРФМИ, РМФ и ТФ сложным образом трансформировались и в итоге объединились в единую кафедру нанофизики (НФ). Кафедра ЭРТирС стала кафедрой радиофизики (РФ), кафедра ТССУ – кафедрой компьютерных технологий (КТ), кафедра ОФиМПФ, объединившись с кафедрой ЭФ, стала кафедрой общей физики и дидактики физики (ОФиДФ). И только кафедра МФ, как самая молодая, сохранила свое название.

Причин для такого естественного процесса много – это прежде всего развитие новых научных направлений, появление новых технологий, престижность научных результатов, которые получали новые поколения преподавателей и сотрудников – выпускников факультета.

Не менее важный фактор – снижение на переломе тысячелетий наборов практически на все специальности факультета, за исключением компьютерных наук, в связи с падением в обществе престижа специальностей «Физика» и «Радиофизика». Одним из выходов из сложившейся ситуации стало открытие на факультете новых специальностей технического профиля, что в итоге в 2011 году привело к переименованию: Физический факультет (ФИЗФАК) стал Физико-техническим (ФИЗТЕХ).

ВРЕМЯ ПЕРЕМЕН: 2014-2025 гг.

Анализировать настоящий период все еще рано. Тем более, что военные действия до сих пор продолжаются. Естественно, что внутрифакультетское равновесие было нарушено, признаком чего явилась частая смена деканов (Собко А.Ю., Данилов В.В., Малюк Н.Г., Фоменко С.А.), открытие новых специальностей, полная перезагрузка учебного процесса.



СОБКО

Александр Юрьевич
(декан с 2014 по 2015 гг., с 2020 по 2021 гг.)



ДАНИЛОВ

Владимир Васильевич
(декан с 2015 по 2016 гг.)



МАЛЮК

Николай Григорьевич
(декан с 2016 по 2018 гг.)



ФОМЕНКО

Сергей Александрович
(декан с 2018 по 2020 гг., с 2021 г. по н.в.)

Отдельно следует выразить искреннюю благодарность декану Собко Александру Юрьевичу, который в самый трудный период в 2014 г. решился возглавить факультет, сумел сохранить единство и сплоченность коллектива факультета, поддержать работу кафедр, а также декану Фоменко Сергею Александровичу, который в не менее трудный период в 2022 г. сделал буквально то же самое.

С 2015 года, благодаря историческому сотрудничеству факультета [2] с ведущими ВУЗами Российской Федерации, начинает работать программа двойных дипломов, которая позволяет выпускникам факультета получать дипломы Российских ВУЗов, помимо дипломов университета.

В 2019-2020 гг. коллективом факультета проделан колоссальный труд по подготовке магистерских программ для прохождения государственной аккредитации в Федеральной службе по надзору в сфере образования и науки, что позволило получать дипломы Российской Федерации непосредственно в Донецком национальном университете.

Казалось бы – наступает долгожданный период стабильности. Однако, наступил очередной трудный период, вследствие которого весь учебный процесс более 5 лет происходил в основном дистанционно.

История циклична ...

Так, в 2023 году университет снова возвращает свое название «Государственный» (приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации №338 от 30 марта 2023 г. Донецкий национальный университет переименован в Донецкий государственный университет) и полностью переходит в подчинение Минобрнауки России.

Сегодня принято отмечать День факультета 12 апреля, в честь Дня космонавтики [3]. В этом году впервые с 2021 г. День факультета прошел очно.



День Физико-технического факультета 2025

Факультету удалось сохранить все 6 кафедр, устоявшихся в предыдущем отрезке времени и направления их учебной и научной деятельности, из них все, кроме кафедры МФ – выпускающие. Так, 60-летний юбилей факультет отметил в составе 6 кафедр:

- 3 кафедры незначительно переименованы:

ФНПМиЭ в 2014 г. стала кафедрой физики неравновесных процессов, метрологии и экологии им. И.Л. Повха (ФНПМиЭ им. И.Л. Повха) - зав. каф. канд. физ.-мат. наук, с.н.с. Асланов П.В.) [4-6], НФ в 2015 г. стала кафедрой теоретической физики и нанотехнологий (ТФиНТ) - зав. каф. д-р. физ.-мат. наук, проф. Петренко А.Г., РФ в 2016 г. стала кафедрой радиофизики и инфокоммуникационных технологий (РФиИКТ) - зав. каф. д-р. техн. наук, проф. Данилов В.В. [7, 8];

- 3 кафедры сохранили свои названия:

КТ (компьютерных технологий) - зав. каф. д-р. техн. наук, проф. Аверин Г.В., ОФиДФ (общей физики и дидактики физики) - зав. каф. канд. физ.-мат. наук Безус А.В., МФ (математической физики) - зав. каф. канд. физ.-мат. наук, доц. Колесник В.И.

Вопреки существующим сегодня трудностям и проблемам - факультет продолжает жить: открываются новые современные направления подготовки; кафедры оснащаются оборудованием, техникой и мебелью; выполняются госбюджетные научные исследования; проводятся мероприятия международного уровня; издается журнал ВАКовского уровня [9]; готовятся и защищаются диссертации, присваиваются ученые звания; ключевые должности занимают молодые кадры; профессорско-преподавательский состав проходит стажировки и повышения квалификации в ведущих ВУЗах большой России; и, наконец, учебный процесс начался в обычном (очном) режиме. Кроме того, признак стабильности – бессменный декан (Фоменко С.А.) практически 5 лет. А настал ли снова период стабильности? Узнаем к 65-летию юбилею факультета.

Зам. декана по научной работе
Физико-технического факультета
с 2021 по н.в.
канд. техн наук, доц. Третьяков И.А.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Милославский, А. Г. Нам - 55 / А. Г. Милославский // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2020. – № 1. – С. 97-103. – EDN PHGDUM.
2. Петренко, А. Г. Ретроспектива и будущее партнерских научно-образовательных связей физико-технического факультета ДонНУ с вузовскими коллективами стран СНГ / А. Г. Петренко, П. В. Асланов, И. А. Третьяков // Международное сотрудничество вузов государств - участников Содружества Независимых Государств. Роль технических университетов в формировании единого научно-технологического и образовательного пространства СНГ: сборник научных статей. – Москва: Ассоциация технических университетов, 2021. – С. 116-121. – EDN FOKVJH.
3. Третьяков, И. А. 60-летию первого полёта человека в космос / И. А. Третьяков // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2021. – № 2. – С. 124-127. – EDN IJPQWQ.
4. 110-летию со дня рождения выдающегося учёного, члена-корреспондента ан УССР, профессора, доктора технических наук, заслуженного деятеля науки и техники Ивана Лукича Повха // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2019. – № 3. – С. 75-78. – EDN GMAMLF.
5. Белоусов, В. В. Повх Иван Лукич - Учитель, Ученый, Человек / В. В. Белоусов // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2019. – № 4. – С. 81-82. – EDN JLCWCV.
6. 55-летию кафедры физики неравновесных процессов, метрологии и экологии имени Ивана Лукича Повха // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2020. – № 4. – С. 86-91. – EDN VZDTDD.
7. Третьяков, И. А. 55-летию кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий / И. А. Третьяков // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2020. – № 4. – С. 78-85. – EDN AQNRCP.
8. 75-летнему юбилею Владимира Васильевича Данилова // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 3. – С. 62-63. – EDN XUKVLW.
9. Третьяков, И. А. 5-летию деятельности редакции научного журнала "Вестник ДонНУ. Серия Г: Технические науки" / И. А. Третьяков // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 1. – С. 70-91. – EDN SGLATW.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

1. Редакция журнала «Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки» принимает к рассмотрению на предмет опубликования в журнале ранее не опубликованные и не представленные для одновременной публикации в других изданиях научные статьи по тематике журнала.
2. Авторы статей несут персональную ответственность за наличие элементов плагиата в текстах статей, за полноту и достоверность изложенных фактов и положений, за факт их публикации. Допускается публикация не более двух статей от одного автора в одном номере и наличие не более пяти авторов одной статьи. Один из авторов должен иметь ученую степень. Гонорар не выплачивается и плата за публикацию статей не взимается.
3. Авторами представляется рукопись статьи в одном экземпляре (на русском или английском языке), напечатанном с одной стороны листа бумаги формата А4 (экземпляр подписывается авторами). Страницы рукописи должны быть последовательно пронумерованы. Объем рукописи, как правило, от 5 до 15 страниц (для обзорной статьи – до 25), включая рисунки, таблицы, список источников, сведения об авторах. Вместе с рукописью на адрес электронной почты vestnik.g@mail.ru высылается электронный вариант с полным текстом статьи в формате doc или docx. При отсутствии возможности предоставления в редколлегию рукописи, на электронную почту редакции высылается полный текст статьи в формате pdf. Статьи, не соответствующие Правилам для авторов или тематике журнала, к рассмотрению не принимаются. Все статьи, принятые к рассмотрению, подвергаются рецензированию и в случае положительной рецензии – научному и техническому редактированию.
4. Решение о публикации, публикации после доработки/переработки или отклонении статьи принимается редакционной коллегией журнала. Если статья рекомендуется к публикации после небольшой авторской доработки, редакция направляет авторам статьи замечания (без указания рецензента). Статья, направленная авторам на доработку, должна быть возвращена в исправленном виде в максимально короткий срок. К доработанной статье необходимо предоставить письмо от авторов, содержащее ответы на все замечания и поясняющие все изменения, сделанные в статье. В случае отклонения статьи редакция направляет авторам рецензию (без указания рецензента) или выдержки из нее, либо аргументированное письмо редактора. Редакция не вступает в дискуссию с авторами отклоненных статей, за исключением случаев явного недоразумения.
5. Обязательные требования к оформлению статей:
 - **Размер бумаги:** А4.
 - **Ориентация:** книжная.
 - **Поля:** зеркальные, верхнее – 30 мм, нижнее – 30 мм, внутри – 30 мм, снаружи – 20 мм.
 - **Положение верхнего и нижнего колонтитула относительно края:** 2 см.
 - **Междустрочный интервал:** одинарный.
 - **Абзацный отступ:** 1 см.
 - **Основной текст статьи:** шрифт Times New Roman, размер 12 пт., с выравниванием по ширине, без автоматической расстановки переносов.
 - **Аннотация, список источников, сведения об авторах:** шрифт Times New Roman, размер 10 пт., с выравниванием по ширине, без автоматической расстановки переносов.
 - **Подписные подписи, заглавие и содержание таблиц:** шрифт Times New Roman, размер 10 пт., с выравниванием по центру, без автоматической расстановки переносов.

6. Текст статьи должен соответствовать следующей структурной схеме:

- **Первая строка:** индекс УДК – выравнивание по левому краю, без абзацного отступа.
- **Через строку:** **НАЗВАНИЕ** статьи – полужирный, выравнивание по центру, прописными буквами, без переноса слов, без абзацного отступа.
- **Через строку:** копирайт © и год – полужирный, выравнивание по левому краю, без точки после года, через 3 пробела *фамилия(и) и инициалы автора(ов)* – полужирный, курсив, выравнивание по левому краю, без абзацного отступа.
- **Через две строки:** аннотация объемом до 100 слов, кратко отражающая предмет статьи, примененные методы исследований и основные результаты, полученные авторами.
- **На следующей строке:** словосочетание *Ключевые слова:* – полужирный, курсив. Далее приводятся ключевые слова количеством до 10 слов, отделяемых друг от друга запятой. Блок аннотация и ключевые слова рекомендуется отделять от основного текста с помощью инструмента «Границы».
- **Через две строки:** основной текст статьи, который содержит введение, основную часть и выводы. Во **введении** рекомендуется излагать постановку проблемы в общем виде и связь с важнейшими научными и практическими задачами, анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и на которые опирается автор, выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящена статья, формулировку целей статьи. В **основной части** рекомендуется излагать основные материалы исследования с полным обоснованием полученных научных результатов. Основную часть рекомендуется структурировать на разделы с названиями, отражающими их содержание (например: постановка задачи; методы ее решения; анализ полученных результатов). В **выводах** рекомендуется кратко и четко подводить итоги основных результатов, полученных авторами и описывать перспективы дальнейших исследований в данном направлении.
- **Через строку:** словосочетание **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ** размером 10 пт., полужирный, выравнивание по левому краю, прописными буквами, без абзацного отступа. Далее через строку с абзачным выступом 0,5 см приводится нумерованный перечень используемых источников общим списком в порядке упоминания в тексте на языке оригинала в соответствии с ГОСТ Р 7.0.100–2018 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления». Ссылка на источник приводится в квадратных скобках. Разрешается ссылаться только на опубликованные работы. Необходимо наличие источников последних 5-10 лет по исследуемому вопросу.
- **Через строку:** надпись «Поступила в редакцию *хх.хх.20хх г.*, рекомендована к печати *хх.хх.20хх г.*» размером 10 пт., курсив, выравнивание по правому краю.
- **Через строку:** приводится **НАЗВАНИЕ** статьи, *фамилия(и) и инициалы автора(ов)*, аннотация и ключевые слова (**Keywords**) на английском языке (перевод) размером 10 пт.
- **Через строку:** сведения об авторах размером 10 пт., в таблице с параметром «Нет границ», содержащей два столбца (для сведений на русском и английском языках):
- **Фамилия, имя, отчество;**
- ученая степень, ученое звание, должность, с указанием организации (в соответствии с уставом), которую представляет автор;
- страна, город;
- адрес электронной почты.

7. Образец оформления статьи:

УДК 681.5:621.37

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В АСНИ РАДИОСИГНАЛОВ

© 2025 Третьяков И.А., Данилов В.В.

В данной работе приведены описания элементов устройств вычислительной техники для создания специализированных автоматизированных систем научных исследований контроля радиообстановки на основе фотонного эхо-эффекта. Показано, что комбинирование оптических и радиотехнических ...

Ключевые слова: обработка радиосигналов, оптические методы, АСНИ, радиообстановка.

Введение. Важнейшим элементом современной концепции [1-3] ...

Механизм формирования сигналов. Несмотря на принципиальное [4] ...

Выводы. Таким образом, не смотря на сложность протекающих процессов ...

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Третьяков, И. А. Элементы устройств вычислительной техники для АСНИ контроля радиообстановки на основе эхо-эффекта / И. А. Третьяков, В. В. Данилов, С. В. Борщевский // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 1. – С. 34-39. – EDN CADMAM.
2. Разработка автономной автоматизированной системы непрерывного контроля состояния строительного объекта / В. Ю. Подлесный, В. И. Тимченко, И. А. Третьяков [и др.] // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 2. – С. 51-59. – EDN PHCERN.
3. Автоматизированные системы научных исследований [Электронный ресурс] / Studbooks : [Сайт]. – URL: <https://studbooks.net/1386372/> (дата обращения 25.01.2025).

Поступила в редакцию xx.xx.2025 г., рекомендована к печати xx.xx.2025 г.

APPLICATION OF OPTICAL INFORMATION PROCESSING METHODS IN ASRS OF SIGNALS

Tretiakov I.A., Danilov V.V.

This paper describes the elements of computer technology devices for the creation of specialized automated systems for scientific research of radio control based on the photonic echo effect. It is shown that the combination of optical and radio engineering ...

Keywords: radio signal processing, optical methods, ASRS, radio substitution.

Третьяков Игорь Александрович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиоп физики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: i.tretiakov@mail.ru

Tretiakov Igor Aleksandrovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

Данилов Владимир Васильевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиоп физики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.
E-mail: ut5iv@mail.ru

Danilov Vladimir Vasilevich

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

8. Рисунки и таблицы располагаются по тексту строго в пределах печатного поля книжной ориентации страниц после их первого упоминания в тексте статьи. Вся текстовая информация на рисунках должна быть четкой и разборчивой и не иметь лишних деталей. Каждый рисунок должен иметь подрисуночную подпись (не совмещенную с рисунком) в формате: «Рис. №. Название». Каждая таблица должна иметь заглавие в формате: «Таблица №. Название». Во избежание смещений рисунков рекомендуется размещать их в таблицах с двумя строками с параметром «Нет границ» (в первой строке размещается рисунок, во второй - подрисуночная подпись). Все рисунки и таблицы должны быть последовательно пронумерованы арабскими цифрами, допускается применение букв при нумерации рисунков, состоящих из нескольких частей. Сканированные рисунки не допускаются. Образец оформления рисунка и таблицы:

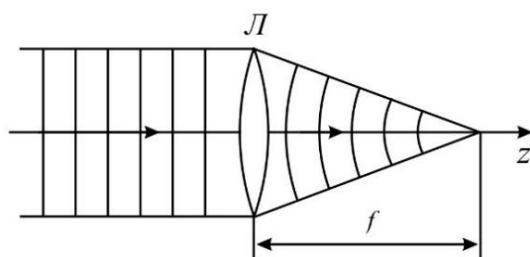


Рис. 1. Действие линзы на плоскую волну

Таблица 1. Номиналы элементов схемы УМ класса F₃

Элемент	Номинал	Единица измерения
C _{out}	25	пФ
C ₁	10	нФ
C ₂	100	мкФ
L ₁	150	мкГн
L ₂	460	нГн
L ₃	765	нГн
R ₁	0,39	МОм

9. Формулы выравниваются по центру и имеют, при необходимости, сквозную нумерацию по правому краю. Для выравнивания формул рекомендуется использовать таблицы с параметром «Нет границ». После формул ставится тот знак препинания, который необходим исходя из построения фразы. Нумеровать следует только те формулы, на которые имеются ссылки в тексте. Ссылки на формулы приводятся в круглых скобках. Каждая формула отделяется от основного текста интервалом в 6 пт. перед и после. Формулы, их компоненты и все переменные в тексте и отдельно в строках набираются только с помощью редакторов формул Microsoft Equation 3.0 или MathType 5.0 и выше с параметрами:

- **текст и переменная:** наклонный;
- **матрица-вектор:** полужирный наклонный;
- **размер:** обычный - 12 пт., крупный индекс - 9 пт., мелкий индекс - 7 пт., крупный символ - 18 пт., мелкий символ - 12 пт.

Образец оформления формулы:

$$y_t = c_0 + \sum_{i=1}^n c_i y_{t-i} + b \xi_t \quad (1)$$

10. Материалы предоставляются по адресу:

283001, Российская Федерация, Донецкая Народная Республика, г. Донецк, пр. Театральный, д. 13, Физико-технический факультет.

Главный редактор: Данилов Владимир Васильевич, каб. 203.

Зам. главного редактора: Третьяков Игорь Александрович, каб. 210.

Ответственный секретарь: Пометун Екатерина Дмитриевна, каб. 001.

Контактный тел.: +7 (856) 302 07 81

E-mail: vestnik.g@mail.ru

Научное издание

**Вестник Донецкого национального университета.
Серия Г: Технические науки**

– 2025. – № 2.

Научное и техническое редактирование: И.А. Третьяков, Е.Д. Пометун

Адрес редакции:

ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,
283001, Российская Федерация, ДНР, г. Донецк, пр. Театральный, д. 13.

Тел.: +7 (856) 302 07 81

E-mail: vestnik.g@mail.ru

URL: <http://donnu.ru/vestnikG>

Подписано в печать 17.04.2025 г.

Формат 60×84/8. Бумага офсетная.

Печать – цифровая. Усл. печ. л. 23,37.

Тираж 100 экз.

Бесплатно.

Издательство ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»
283001, Российская Федерация, ДНР, г. Донецк, ул. Университетская, д. 24.

Тел.: +7 (856) 302 92 27.