

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

---

---

3/2024

---

---

**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. Башева;** 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. Вытовтов;** 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. Паслён;** 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. Alekseichik;** 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. Borshevskii;** 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. Shevtsov;** 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](mailto: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**) 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](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 №11 от 01.10.2024 г.*

**Вестник  
Донецкого  
национального  
университета**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**

ОСНОВАН В 1997 ГОДУ,  
СЕРИЯ Г ОСНОВАНА В 2018 ГОДУ

Номер посвящён 110-летию со дня  
рождения выдающегося учёного,  
академика АН УССР, профессора,  
доктора физико-математических  
наук, заслуженного деятеля науки  
Александра Александровича Галкина

**Серия Г: Технические науки**

**№ 3/2024**

---

**СОДЕРЖАНИЕ**

---

**ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ**

*Ниженец Т.В., Лютов А.Г., Чернышев Н.Н.* Способ оценки местоположения мобильных объектов на основе метода роя частиц 5

*Мазохин В.Н., Уласов Г.А., Курушин А.А.* Радиотехническая система лечения раковых опухолей и уплотнений тела 17

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ**

*Левина Т.М., Муталлапов Р.Н., Ушаков А.С.* Программный модуль формирования отчёта по результатам проверок трехмерной модели на пространственные пересечения 29

*Al-Khafaji I.M., Rapov A.V.* Dynamic and mathematical modeling of wheeled ground robots for navigating rough terrain: development, simulation, and real-world validation 35

*Звягинцева А.В., Гучмазова Т.К., Клеменюк Р.В.* Выявление взаимосвязи сложных событий на примере анализа статистических данных о чрезвычайных ситуациях 45

*Пономарёв Д.С.* Разработка категориальных фильтров данных для обработки информации на примере статистических форм производственного сектора пенитенциарной системы 55

*Подлесный В.Ю., Данилов В.В., Третьяков И.А., Колесник Е.В.* Основы информационно-измерительных технологий в АСУ и АСНИ 64

*Пономарёв Д.С., Горохов М.М.* Разработка систем сравнительного анализа ключевых параметров эффективности производственного сектора при помощи языка python 75

*Рудак Л.В., Зори С.А.* Интеллектуальная система навигации на основе обработки естественного языка 83

*Саломатин А.А.* Анализ структур систем информационной поддержки транспортировки грузов с помощью гетерогенной группы БПЛА с учетом метеорологических условий 92

*Шубников В.С., Завадская Т.В., Борщевский С.В.* К вопросу об интеллектуальных системах выбора параметров воздухообеспечения добычных участков шахт 102

<i>Прокопьев А.П.</i> Мультидоменный анализ вибрационных параметров дорожного катка для автоматизированного прогнозирования уплотненности асфальтобетонной смеси	110
<i>Чепцов М.Н., Климов В.В.</i> Подход к прогнозированию пропускной способности канала связи	119
<i>Рушечников Я.И., Данилов В.В., Третьяков И.А., Зеленченко Д.Р.</i> Методика оценки побочных электромагнитных излучений за счёт алгоритмической обработки массива экспериментальных спектрограмм	126

## **ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

<i>Надеев А.А., Кожухов Н.Н., Прутских Д.А., Дубанин В.Ю.</i> Численное исследование гидродинамики газораспределительной решётки для формирования перемещающегося псевдооживленного слоя	135
<i>Базыкин Д.А., Орехов Е.А., Дахин С.В.</i> Результаты численного моделирования теплообмена при термостатировании поверхности каналов термоэлектрической генераторной установки	144
<i>Косорлуков И.А., Соловьев А.В., Тимченко М.С., Строчков А.В.</i> Интеллектуальная система управления процессами электроснабжения	155
<i>Турулина Ю.О., Бирюков А.Б., Сидоров В.А.</i> Косвенное определение температуры металла на основании анализа энергосиловых параметров черновой клетки прокатного стана	162
<i>Горожанкин С.А., Савенков Н.В., Степакин В.Р.</i> Энергетическая эффективность режимов разгона автомобиля с гибридной силовой установкой	168
<i>Бирюков А.Б., Гнителив П.А.</i> Анализ возможностей реализации оперативного диагностирования уровня энергоэффективности котельного агрегата	178

## **ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**

<i>Хуррамова Н.М., Хуррамов М.Г., Назиров З.Ш., Хуррамова Д.М., Джураева Н.Б.</i> Исследование ресурсосберегающего способа переработки осадков технологических стоков кокономотального производства для получения почвоулучшающей композиции	184
--	-----

## **ИНФОРМАЦИОННАЯ РУБРИКА**

Правила для авторов	190
---------------------	-----

# Bulletin of Donetsk National University

SCIENTIFIC JOURNAL

FOUNDED IN 1997,  
SERIES G FOUNDED IN 2018

Number dedicated to the 110th  
birthday of the outstanding scientist,  
academician of the Academy of  
Sciences of the USSR, professor,  
doctor of physical and mathematical  
sciences, honored worker of science  
Aleksandr Aleksandrovich Galkin

Series G: Technical sciences

№ 3/2024

---

## CONTENTS

---

### ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT ENGINEERING AND COMMUNICATION

*Nizhenets T.V., Liutov A.G., CHernyshev N.N.* Method for estimating the location of mobile objects using particle swarm method 5

*Mazokhin V.N., Ulasov G.A., Kurushin A.A.* Radio-technical system for treatment of cancerous tumors 17

### INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

*Levina T.M., Mutallapov R.N., Ushakov A.S.* Software module for generating a report on the results of checks of a 3D-model for spatial intersections 29

*Al-Khafaji I.M., Panov A.V.* Dynamic and mathematical modeling of wheeled ground robots for navigating rough terrain: development, simulation, and real-world validation 35

*Zviagintseva A.V., Guchmazova T.K., Klemeniuk R.V.* Identifying the relationship of complex events by example analysis of statistical data on emergency situations 45

*Ponomarev D.S.* Development of category data filters for information processing on the example of statistical forms of the production sector of the penitential system 55

*Podlesnyi V.IU., Danilov V.V., Tretiakov I.A., Kolesnik E.V.* Fundamentals of information and measurement technologies in ACS and ASRS 64

*Ponomarev D.S., Gorokhov M.M.* Development of systems for comparative analysis of key parameters of the efficiency of the production sector using the python language 75

*Rudak L.V., Zori S.A.* Intelligent navigation system based on natural language processing 83

*Salomatin A.A.* Analysis of structures of information support systems for cargo transportation using a heterogeneous group of UAVs taking into account meteorological conditions 92

*SHubnikov V.S., Zavadskaia T.V., Borshchevskii S.V.* Intelligent system for selecting air supply parameters for mining areas of a mine 102

<i>Prokopev A.P.</i> Multi-domain analysis of a roller vibroparameters for automated predict of compactness asphalt concrete mixture	110
<i>CHeptsov M.N., Klimov V.V.</i> Communication channel's bandwidth predicting approach	119
<i>Rushechnikov IA.I., Danilov V.V., Tretiakov IA., Zelenchenko D.R.</i> Method for evaluating side electromagnetic radiation due to algorithmic processing of an array of experimental spectrograms	126

## **ENERGETICS AND ELECTRICAL ENGINEERING**

<i>Nadeev A.A., Kozhukhov N.N., Prutskikh D.A., Dubanin V.IU.</i> Numerical study of hydrodynamics of gas distribution grid for forming a moving fluidized bed	135
<i>Bazykin D.A., Orekhov E.A., Dakhin S.V.</i> Results of heat transfer numerical simulation during thermostating of the surface of the channels of the thermoelectric generator plant	144
<i>Kosorlukov IA., Solovov A.V., Timchenko M.S., Strochkov A.V.</i> Smart powergrid control system	155
<i>Turulina IU.O., Biriukov A.B., Sidorov V.A.</i> Indirect determination of metal temperature based on analysis of energy-power parameters of a rolling mill rough stand	162
<i>Gorozhankin S.A., Savenkov N.V., Stepakin V.R.</i> Energy efficiency of hybrid vehicle acceleration modes	168
<i>Biriukov A.B., Gnitiev P.A.</i> Analysis of the possibilities of implementing operational diagnostics of the boiler unit energy efficiency level	178

## **TECHNOSPHERE SAFETY**

<i>KHurramova N.M., KHurramov M.G., Nazirov Z.SH., KHurramova D.M., Dzhuraeva N.B.</i> Investigation of a resource-saving method of processing sludge of technological wastewater of coconut reeling production to obtain a soil-improving composition	184
--	-----

## **INFORMATION SECTION**

Instructions for authors	190
--------------------------	-----

## СПОСОБ ОЦЕНКИ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА РОЯ ЧАСТИЦ

© 2024 *Ниженец Т.В., Лютов А.Г., Чернышев Н.Н.*

---

В работе представлено исследование способа определения местоположения мобильных объектов на основе метода роя частиц. Предлагаемый подход направлен на повышение точности, надежности и эффективности определения местоположения по сравнению с традиционными методами. В ходе исследования были проведены теоретический анализ, моделирование и экспериментальная оценка эффективности предложенного метода в сравнении с методом наименьших квадратов. Результаты исследования могут быть использованы для разработки новых систем определения местоположения, которые будут более точными, надежными и универсальными, чем существующие решения.

**Ключевые слова:** способ, местоположение, мобильный объект, метод роя частиц.

---

**Введение.** В последние годы наблюдается значительный рост интереса к методам определения местоположения, основанным на различных технологиях, таких как глобальные навигационные спутниковые системы, беспроводные сети и инерциальные измерительные устройства. Эти методы находят широкое применение во многих областях, среди которых можно выделить навигацию, отслеживание объектов, управление транспортом и т.д. Однако существующие подходы часто сталкиваются с ограничениями, связанными с точностью, надежностью, доступностью сигналов, энергопотреблением и вычислительной сложностью [1-3].

Для преодоления этих ограничений проводятся исследования в области альтернативных методов определения местоположения, в том числе основанных на методах оптимизации роя частиц. Метод роя частиц (Particle Swarm Optimization, PSO) – это популяционный алгоритм оптимизации, который имитирует поведение стаи птиц или косяка рыб, чтобы найти оптимальное решение [4, 5].

Основные преимущества использования метода роя частиц для определения местоположения [6] заключаются в:

1. Высокой точности - метод роя частиц способен эффективно находить оптимальные решения, что может повысить точность определения координат мобильного объекта (узла).

2. Адаптивности - метод роя частиц обладает способностью адаптироваться к изменяющимся условиям окружающей среды, что важно для мобильных приложений.

3. Низкой вычислительной сложностью - алгоритмы, основанные на методе роя частиц, характеризуются относительно низкой вычислительной сложностью, что позволяет реализовать их на ограниченных аппаратных ресурсах.

4. Отсутствию необходимости в априорной информации - метод роя частиц не требует наличия подробной информации о среде распространения сигналов, что упрощает его применение.

Таким образом, исследование способа определения местоположения на основе метода роя частиц представляет значительный научный и практический интерес, поскольку может способствовать повышению точности, надежности и эффективности определения координат мобильных объектов в различных приложениях.

**Постановка задачи.** Рассмотрим задачу об определении координат мобильного узла в двумерном пространстве с помощью измеренного расстояния до нескольких известных точек. Пусть есть  $N$  точек в двумерном пространстве с известными координатами  $P_i(x_i, y_i)$ , где  $i=1,2,\dots,N$ , при этом известно расстояние  $d_i$  от каждой точки  $P_i(x_i, y_i)$  до мобильного узла, необходимо найти координаты  $P_0(x_0, y_0)$  мобильного узла (рис. 1).

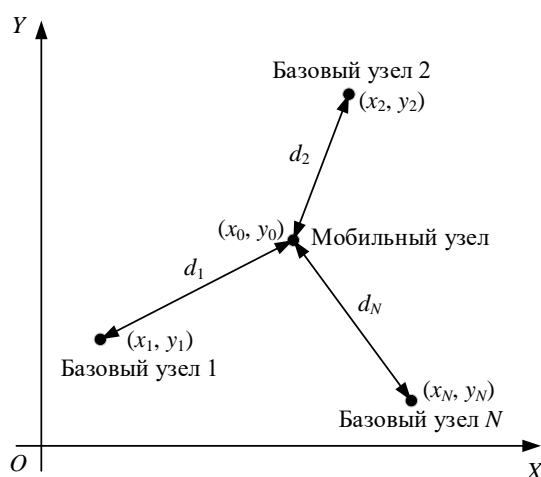


Рис. 1. К определению позиции мобильного узла в двумерном пространстве с помощью измеренного расстояния до нескольких известных точек

Существуют различные методы решения этой задачи, среди которых:

1. Метод трилатерации – это геометрический метод определения местоположения объекта (мобильного узла), использующий расстояния до трёх известных точек (базовых узлов) [7, 8]. Координаты мобильного узла представляют собой точку пересечения трех окружностей с центрами в известных точках и радиусами, равными измеренным расстояниям до этого узла (рис. 2).

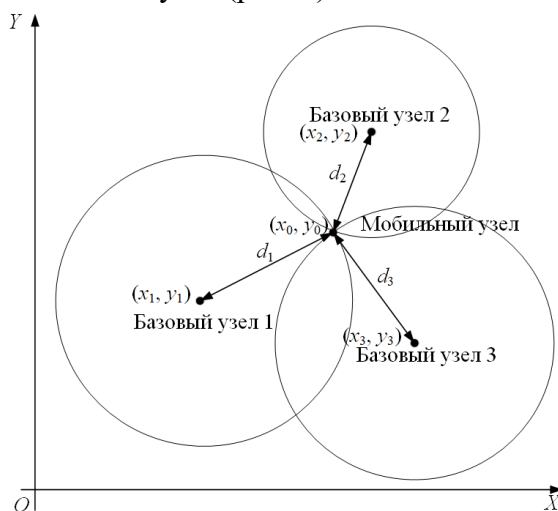


Рис. 2. Геометрическая интерпретация метода триангуляции



Аналитический алгоритм нахождения точки пересечения трех окружностей заключается в задании координат центров окружностей и их радиусов, а также нахождения решения системы уравнений:

$$\begin{cases} (x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 = d_1^2, \\ (x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2 = d_2^2, \\ (x_0 - x_3)^2 + (y_0 - y_3)^2 = d_3^2. \end{cases} \quad (1)$$

Если окружности не имеют общей точки, то система уравнений (1) не будет иметь решения.

2. Метод многосторонней трилатерации (MLAT, Multilateration) является расширением классического метода трилатерации, используемого для определения позиции объекта в пространстве [7, 8]. Вместо трёх базовых узлов и трёх измеренных расстояний от них до мобильного узла, используемых в трилатерации, используется более трёх базовых узлов и соответствующие измеренные расстояния для более точного определения позиции. Метод MLAT находит точку, которая находится на минимальном расстоянии от всех окружностей.

3. Метод наименьших квадратов (МНК) минимизирует сумму квадратов разностей между измеренным и теоретическим расстоянием до мобильного узла. Решение системы уравнений (2) с помощью МНК позволяет получить координаты мобильного узла [7]:

$$\begin{cases} (x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 = d_1^2, \\ (x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2 = d_2^2, \\ \dots \\ (x_0 - x_N)^2 + (y_0 - y_N)^2 = d_N^2. \end{cases} \quad (2)$$

Недостатками перечисленных методов является их чувствительность к ошибкам, т.е. любая ошибка в измерении расстояния может привести к существенному искажению местоположения объекта и точки пересечения окружностей могут быть не единственными, или их может не быть вовсе, если базовые узлы расположены не оптимально.

При работе систем позиционирования внутри зданий и сооружений на основе методов трилатерации наблюдаются положительные ошибки в измерении расстояния, обусловленные эффектом многолучевости. При многолучевом распространении электромагнитной волны возникает несколько путей распространения сигнала, которые достигают приемника в разное время. Это приводит к интерференции сигналов и задержке приема сигнала. Типичные значения задержки при многолучевом распространении в помещениях колеблются от единиц до сотен наносекунд, на открытой местности – от единиц до десятков микросекунд, в городских условиях – от единиц до сотен микросекунд. Поэтому на практике использование метода трилатерации приводит к ситуации, когда окружности в общем случае не пересекаются в одной общей точке, что делает решение поставленной задачи позиционирования не тривиальным [9].

Например, для случая, когда базовые узлы располагаются на одной линии, как показано на рис. 3, однозначно определить координаты мобильного узла с помощью трилатерации и МНК невозможно.

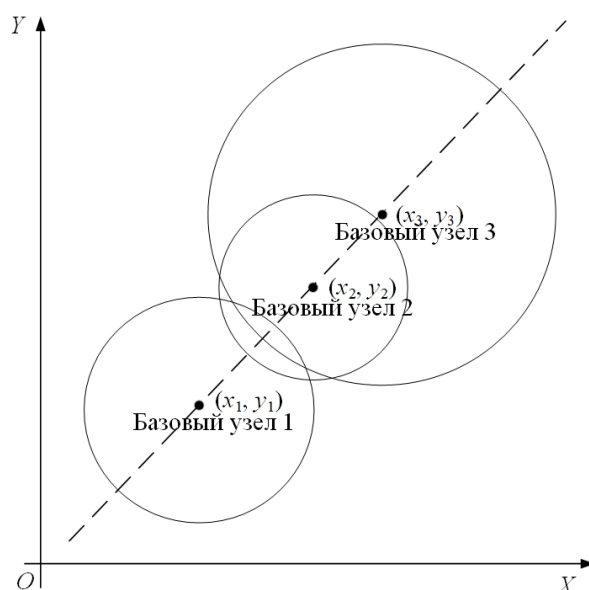


Рис. 3. Пример расположения базовых узлов, при котором невозможно однозначно определить местоположение мобильного узла при помощи трилатерации и МНК

В таких случаях возникает необходимость в разработке альтернативных способов определения местоположения, предоставляющих оптимальные, в некотором смысле, оценки координат мобильного объекта.

**Описание метода роя частиц для решения задачи оценки местоположения мобильного объекта.** Выпишем функционал, соответствующий сумме квадратов кратчайших расстояний от точки с координатами  $P_0(x_0, y_0)$  до окружностей с координатами центра  $P_i(x_i, y_i)$  и радиусами  $d_i$ , где  $i = 1, 2, \dots, N$ :

$$J(x_0, y_0) = \sum_{i=1}^N \left( \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2} - d_i \right)^2 \rightarrow \min. \quad (3)$$

Координаты точки, при которых целевая функция достигает минимального значения, обозначим как  $P_0^{opt}(x_0^{opt}, y_0^{opt})$ . В общем случае точка  $P_0^{opt}$  может не принадлежать области пересечения всех окружностей  $O_i$ , в которой находится мобильный агент. Поэтому при решении оптимизационной задачи необходимо учесть ограничение вида

$$P_0^{opt} \in O_1 \cap O_2 \cap \dots \cap O_N. \quad (4)$$

Найдем минимальное значение функционала (3) с помощью метода роя частиц. Алгоритм PSO состоит в выполнении следующих этапов [5, 6]:

1. Инициализация. Задается уравнение целевой функции (3), количество частиц роя  $M$  и случайным образом инициализируются позиции (координаты)  $P_j(x_j, y_j)$  и скорости частиц  $V_j$  ( $j = 1, 2, \dots, M$ ) в пространстве поиска экстремума функции.

2. Итерации. Для каждой частицы вычисляется значение целевой функции для текущей позиции  $J_j(x_j, y_j)$ , обновляется личная лучшая позиция  $P_j^{pb}(x_j^{pb}, y_j^{pb})$ , если текущая позиция дает лучшее значение целевой функции. Глобальная лучшая позиция среди всех частиц  $P^{gb}(x^{gb}, y^{gb})$  обновляется, если текущая позиция дает лучшее значение целевой функции среди всех частиц.

Обновление скорости и позиции частицы выполняется на основании уравнений:

$$V_j(k+1) = w \cdot V_j(k) + r_1 \cdot c_1 \cdot (P_j^{pb}(k) - P_j(k)) + r_2 \cdot c_2 \cdot (P^{gb}(k) - P_j(k)),$$

$$P_j(k+1) = P_j(k) + V_j(k+1), \quad k = 1, 2, \dots, L,$$

где  $k$  – номер итерации;  $w$  – коэффициент инерции;  $c_1, c_2$  – коэффициенты обучения, которые отражают стремление частицы достигнуть глобально лучшего решения, либо ориентироваться на собственное лучшую позицию;  $r_1, r_2$  – коэффициенты, которые могут принимать случайные значения из интервала  $[0; 1]$ .

Коэффициент инерции  $w$  определяет баланс между глобальным и локальным поиском в процессе оптимизации. Он оказывает влияние на скорость движения частиц и их способность исследовать пространство поиска.

Значения коэффициентов когнитивной  $c_1$  и социальной  $c_2$  составляющих определяют, насколько «сильно» лучшая личная позиция и лучшая глобальная позиция роя влияют на обновление скорости частицы.

3. Остановка. Алгоритм останавливается, когда достигнуто максимальное количество итераций или когда достигнута требуемая точность решения. Таким образом определяются координаты точки  $P_0^{opt}(x_0^{opt}, y_0^{opt}) = P^{gb}(x^{gb}, y^{gb})$  в которой целевая функция (3) достигает минимального значения, т.е. получается оптимальная оценка местоположения объекта.

**Моделирование определения местоположения мобильного агента на основе метода роя частиц.** Рассмотрим случай, когда имеется три базовых узла и один мобильный агент. На основе метода дальнометрии получены расстояния от всех базовых узлов до агента, при этом использование метода трилатерации приводит к ситуации, когда нет одной общей точки пересечения трех окружностей (рис. 4).

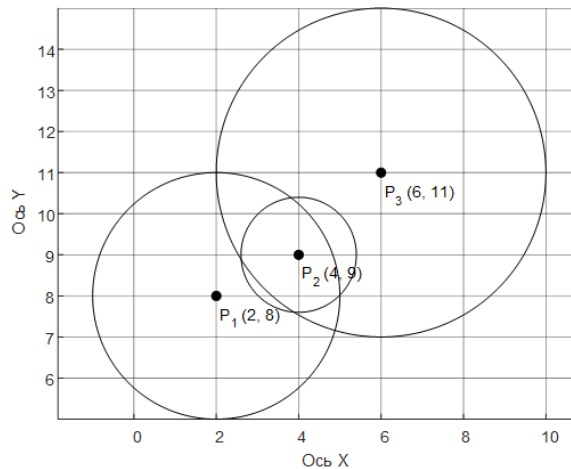


Рис. 4. Пример расположения трех базовых узлов и полученных измерений расстояния до агента

Запишем систему уравнений вида (1), соответствующую рассматриваемому примеру:

$$\begin{cases} (x_0 - 2)^2 + (y_0 - 8)^2 = 3^2, \\ (x_0 - 4)^2 + (y_0 - 9)^2 = 1,4^2, \\ (x_0 - 6)^2 + (y_0 - 11)^2 = 4^2. \end{cases} \quad (5)$$

Найдем значение целевой функции (3) с помощью метода прямого перебора координат точки  $P_0(x_0, y_0)$ , в результате получена объемная поверхность, представленная на рис. 5.

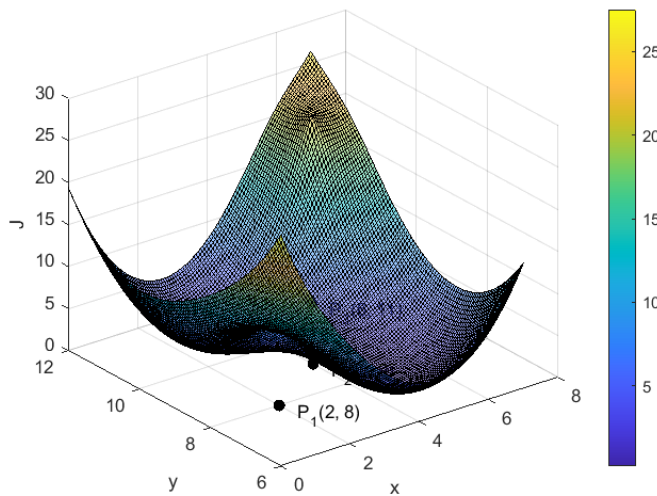


Рис. 5. Объемная поверхностная диаграмма целевой функции

Выполним поиск минимального значения целевой функции (3) с помощью метода роя частиц без учета и с учетом ограничения (4). Результаты приведены на рис. 6 и 7.

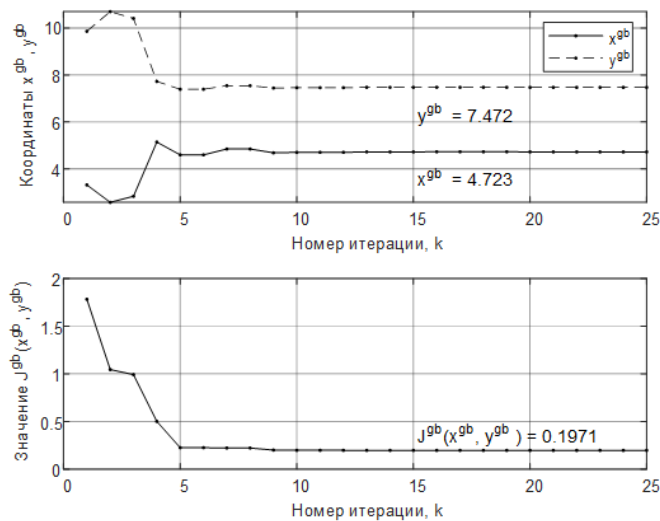


Рис. 6. Результат поиска минимального значения целевой функции без учета ограничений при наличии трех измерений

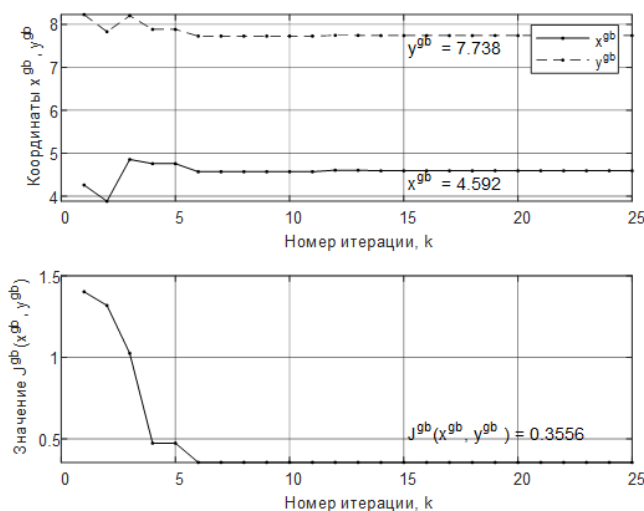


Рис. 7. Результат поиска минимального значения целевой функции с учетом ограничений при наличии трех измерений

В качестве значений настраиваемых параметров выбраны: количество частиц роя  $M = 30$ ; количество итераций  $L = 25$ ; коэффициент когнитивной составляющей  $c_1 = 0.5$ ; коэффициент социальной составляющей  $c_2 = 0.5$ .

Найдем решение системы уравнений (5) с помощью метода наименьших квадратов. Для этого вычтем, допустим, третье уравнение из всех остальных уравнений, тогда координаты агента можно вычислить по формуле:

$$P_0 = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T Y = (6,53 \quad 4,96),$$

где:

$$\Phi = \begin{bmatrix} 2(x_3 - x_1) & 2(y_3 - y_1) \\ 2(x_3 - x_2) & 2(y_3 - y_2) \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} d_1^2 - d_3^2 + x_3^2 - x_1^2 + y_3^2 - y_1^2 \\ d_2^2 - d_3^2 + x_3^2 - x_2^2 + y_3^2 - y_2^2 \end{bmatrix}.$$

На рис. 8 приведены точки с найденными координатами при помощи метода роя частиц и МНК.

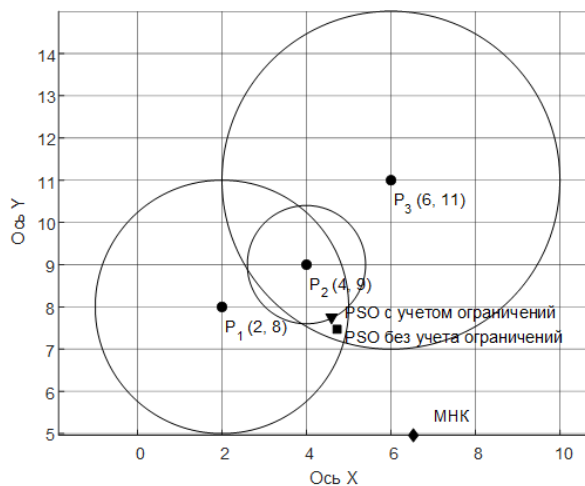


Рис. 8. Результат оценки местоположения мобильного объекта относительно трех базовых узлов на основе метода роя частиц

Как видно из рис. 8, оценка координат мобильного объекта, полученная с помощью МНК, обладает значительной погрешностью.

Рассмотрим случай, когда имеется четыре измеренных расстояния от базовых узлов до мобильного объекта (рис. 9).

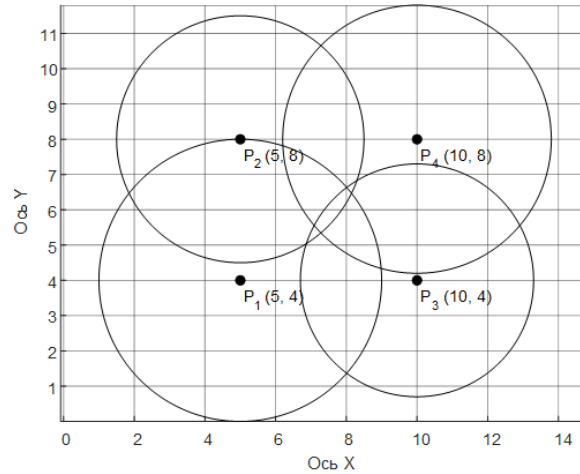


Рис. 9. Пример расположения четырех базовых узлов и полученных измерений расстояния до объекта

Запишем систему уравнений вида (1), соответствующую рассматриваемому примеру:

$$\begin{cases} (x_0 - 5)^2 + (y_0 - 4)^2 = 4^2, \\ (x_0 - 5)^2 + (y_0 - 8)^2 = 3,5^2, \\ (x_0 - 10)^2 + (y_0 - 4)^2 = 3,3^2, \\ (x_0 - 10)^2 + (y_0 - 8)^2 = 3,8^2. \end{cases}$$

На рис. 10 представлена объемная поверхность целевой функции (3) для случая наличия четырех измерений расстояния от четырех базовых узлов до объекта.

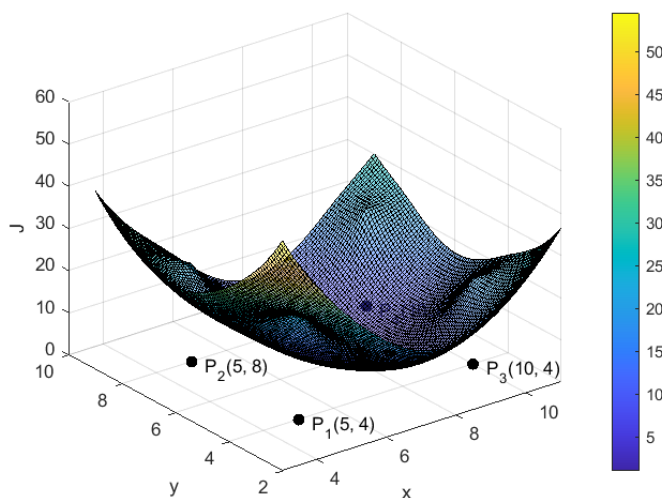


Рис. 10. Объемная поверхностная диаграмма целевой функции для случая четырех базовых узлов

На рис. 11 и 12 представлены результаты поиска минимума целевой функции (3) с помощью метода роя частиц без учета и с учетом ограничения (4).

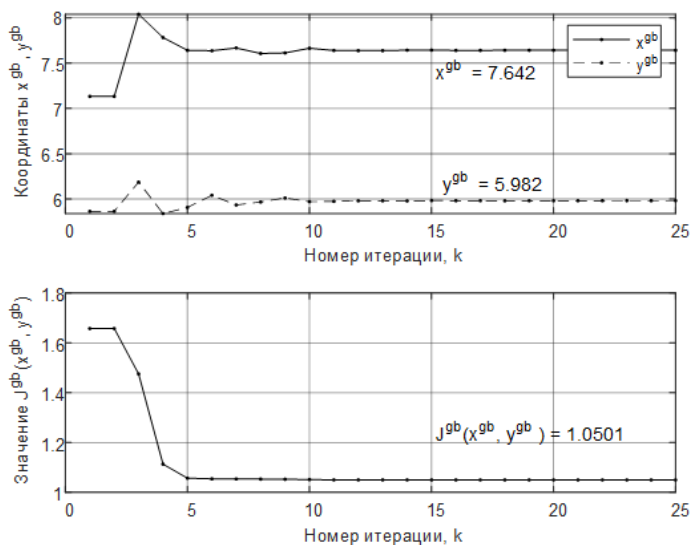


Рис. 11. Результат поиска минимального значения целевой функции без учета ограничений при наличии четырех измерений

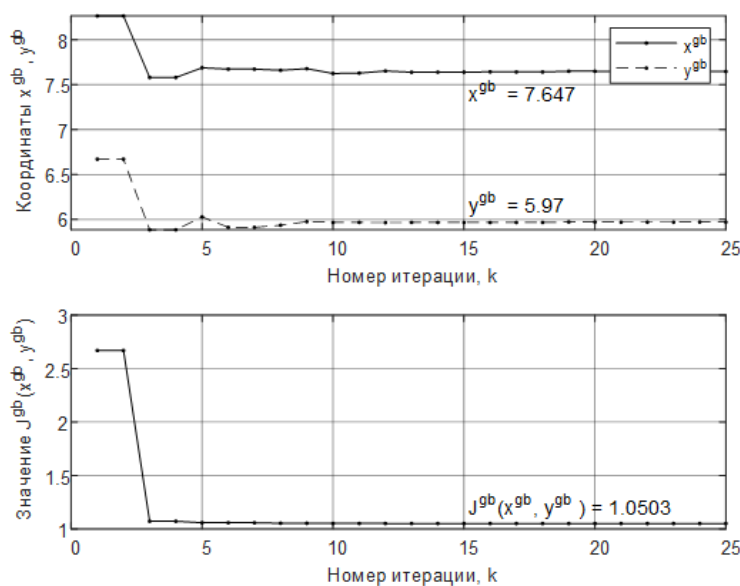


Рис. 12. Результат поиска минимального значения целевой функции с учетом ограничений при наличии четырех измерений

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что найденная точка экстремума лежит в области пересечения четырех окружностей. Алгоритм достаточно быстро сходится, поэтому можно сделать вывод, что заданные параметры метода роя частиц позволяют найти экстремум заданной целевой функции за менее чем 10 итераций.

На рис. 13 приведены точки с найденными координатами с помощью метода роя частиц и МНК. Полученная оценка координат мобильного объекта с помощью МНК находится на границе области пересечения четырех окружностей, что может свидетельствовать о том, что оценка является не точной.

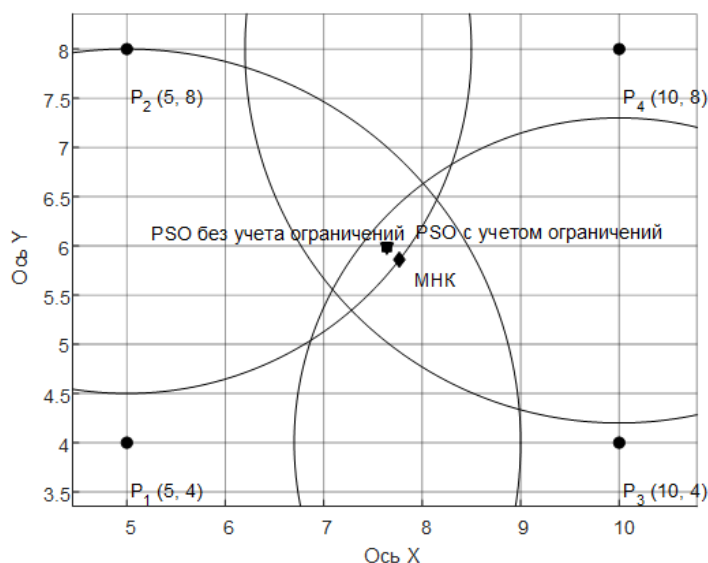


Рис. 13. Результат оценки местоположения мобильного объекта относительно четырех базовых узлов на основе метода роя частиц

Необходимо отметить, что эффективность решения оптимизационной задачи расчета оценки местоположения мобильных объектов на основе метода роя частиц зависит от ряда параметров:

1. Количество частиц в рое  $M$ .

Факторы, влияющие на выбор количества частиц:

- задачи с большим количеством переменных и ограничений обычно требуют большего количества частиц для полного исследования пространства поиска;
- большие пространства поиска требуют большего количества частиц для обеспечения адекватного охвата;
- чем выше требуется точность решения, тем больше необходимо использовать частиц роя;
- большее количество частиц роя требует больших вычислений, потребности в вычислительных ресурсах и, как следствие, увеличения времени выполнения алгоритма.

2. Количество повторений вычислений алгоритма (итераций)  $L$ .

Обоснование выбора количества итераций основывается на тех же правилах, что и выбор количества частиц роя.

3. Значение коэффициента инерции  $w$ .

Этот параметр контролирует влияние предыдущего движения частицы на ее текущее движение. Большое значение  $w$  может привести к медленной сходимости алгоритма, поскольку частица «помнит» свое прошлое движение и продолжает двигаться в том же направлении, даже если лучшие решения находятся в другом направлении. Малые значения  $w$  приводят к увеличению скорости сходимости алгоритма, т.к. частица быстро меняет направление следуя за лучшими решениями. При этом возрастает вероятность попадания частиц в локальные минимумы.

На практике распространены следующие законы изменения коэффициента инерции:

- линейная зависимость, при которой  $w$  постепенно уменьшается от начального до конечного значения по мере увеличения количества итераций;



- экспоненциальная зависимость, при которой  $w$  экспоненциально уменьшается по мере увеличения количества итераций;

- постоянная зависимость, при которой  $w$  остается постоянным на протяжении всех итераций.

Выбор закона изменения  $w$  является эмпирическим процессом. Рекомендуется экспериментировать с различными законами и параметрами для достижения наилучшей производительности алгоритма PSO в конкретной задаче. В работе применялась экспоненциальная зависимость, поскольку на ранних этапах алгоритма с высоким значением  $w$  частицы активно исследуют пространство поиска, что повышает вероятность обнаружения глобального минимума. По мере уменьшения  $w$ , алгоритм переходит к более интенсивному использованию накопленного опыта, что позволяет частицам сходиться к оптимальному решению.

#### 4. Значения коэффициентов обучения $c_1$ и $c_2$ .

При больших значениях  $c_1$  частица больше ориентируется на свою собственную лучшую позицию, что приводит к быстрой сходимости, но также к попаданию в локальные минимумы. В противном случае, скорость сходимости алгоритма уменьшается, при этом осуществляется поиск оптимума в большем пространстве.

При больших значениях  $c_2$  частица больше ориентируется на лучшую позицию роя, что приводит к более быстрому сходимости к оптимуму, но также к потере разнообразия в популяции. В противном случае, частица меньше ориентируется на лучшую позицию роя, что может привести к более медленному сходимости алгоритма, но в тоже время к более широкому исследованию пространства поиска экстремума. Обычно значения коэффициентов  $c_1$  и  $c_2$  выбираются равными 0,5.

**Выводы.** Метод роя частиц предлагает гибкий и эффективный подход к определению местоположения мобильных объектов, который можно адаптировать под конкретные задачи и условия. Благодаря своей способности эффективно исследовать пространство поиска оптимального решения, PSO может быть использован для решения задач определения местоположения в условиях неопределенности и сложных многомерных пространств. Практическое применение предлагаемого способа позволяет повысить точность, надежность, универсальность процесса определения местоположения мобильных объектов. Кроме этого, низкая вычислительная сложность и соответственно высокое быстродействие позволяет рекомендовать данный подход к использованию для оценки местоположения высокодинамичных мобильных объектов.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ниженец, Т. В. Особенности проектирования и применения системы определения местоположения мобильных объектов в условиях ограниченного пространства / Т. В. Ниженец, А. Г. Лютов, Н. Н. Чернышев // Фундаментальные, поисковые, прикладные исследования и инновационные проекты : Сборник трудов Национальной научно-практической конференции, Москва, 10–11 ноября 2022 года / Под редакцией С.У. Увайсова. – Москва: МИРЭА - Российский технологический университет, 2022. – С. 102-104.
2. Ниженец, Т. В. Возможности применения радиочастотных технологий для определения местоположения объектов в складских помещениях / Т. В. Ниженец, Н. Н. Чернышев // Фабрика будущего: переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам для отраслей пищевой промышленности : Сборник научных докладов IV Международной специализированной конференции-выставки, Москва, 26 апреля 2023 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)", 2023. – С. 320-330.

3. Кирсанов, Э. А. Обработка информации в пространственно-распределенных системах радиомониторинга: статистический и нейросетевой подходы / Э. А. Кирсанов, А. А. Сирота. – Москва: Физматлит, 2012. – 343 с.
4. Чернышев, Н. Н. Алгоритм планирования пути в трехмерной детерминированной среде с препятствиями на основе метода роя частиц / Н. Н. Чернышев, Т. В. Ниженец // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2022. – Т. 18, № 6. – С. 7-14. – DOI 10.36622/VSTU.2022.18.6.001.
5. Kennedy, J. Particle swarm optimization / J. Kennedy, R. Eberhart // Proceedings of ICNN'95 – International Conference on Neural Networks. – 1995. – №4. – P. 1942–1948. – DOI 10.1109/ICNN.1995.488968
6. Eberhart, R. C. Particle swarm optimization: developments, applications and resources / R. C. Eberhart, Y. Shi // Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation (IEEE Cat. No.01TH8546). – 2001. – №1. – P. 81–86. – DOI 10.1109/CEC.2001.934374.
7. Методы спутникового и наземного позиционирования. Перспективы развития технологий обработки сигналов / под ред. Д. Дардари, Э. Фаллетти, М. Луизе ; пер. с англ. Е. Б. Махияновой под ред. В. А. Турилова. – Москва: Техносфера, 2012. – 527 с.
8. Bibbo, L. An overview of indoor localization system for human activity recognition (HAR) in healthcare / L. Bibbo, R. Carotenuto, F. Della Corte // Sensors. – 2022. – V. 22(21). – №8119. – P. 1-33. – DOI 10.3390/s22218119.
9. Jwo, D. J. Artificial Neural Networks for navigation systems: A review of recent research / D. J. Jwo, A. Biswal, I. A. Mir // Applied Sciences. – 2023. – V. 13(7). – №4475. – DOI 10.3390/app13074475.

*Поступила в редакцию 15.06.2024 г., рекомендована к печати 28.06.2024 г.*

#### METHOD FOR ESTIMATING THE LOCATION OF MOBILE OBJECTS USING PARTICLE SWARM METHOD

*Nizhenets T.V., Liutov A.G., Chernyshev N.N.*

This paper presents a study of a particle swarm optimization-based approach for location determination. The proposed approach aims to improve the accuracy, reliability, and efficiency of location determination compared to traditional methods. The study involved theoretical analysis, simulation, and experimental evaluation of the proposed method's effectiveness compared to the least squares method. The research results can be used to develop new location determination systems that are more accurate, reliable, and versatile than existing solutions.

**Keywords:** approach, location, mobile object, particle swarm optimization.

**Ниженец Татьяна Владимировна**

аспирант, старший преподаватель кафедры автоматических систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет»,  
Российская Федерация, г. Москва.  
E-mail: nizhenec@mirea.ru

**Nizhenets Tatiana Vladimirovna**

Postgraduate student, Senior Lecturer at Department of Automatic Systems of MIREA – Russian University of Technology,  
Russian Federation, Moscow.

**Лютов Алексей Германович**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматических систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет»,  
Российская Федерация, г. Москва.  
E-mail: lyutov@mirea.ru

**Liutov Aleksei Germanovich**

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Automatic Systems of MIREA – Russian University of Technology,  
Russian Federation, Moscow.

**Чернышев Николай Николаевич**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматических систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет»,  
Российская Федерация, г. Москва.  
E-mail: chernyshev@mirea.ru

**CHernyshev Nikolai Nikolaevich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of Automatic Systems of MIREA – Russian Technological University,  
Russian Federation, Moscow.

## РАДИОТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЛЕЧЕНИЯ РАКОВЫХ ОПУХОЛЕЙ И УПЛОТНЕНИЙ ТЕЛА

© 2024 Мазохин В.Н., Уласов Г.А., Курушин А.А.

---

Положительное и отрицательное воздействие электромагнитного поля на биологическое тело остается чрезвычайно актуальным вопросом. Одним из положительных эффектов облучения биологических объектов является прогрев отдельных частей тела. Гипертермия (прогрев) является существенно важной стороной при лечении раковых опухолей. В статье рассматривается радиотехническая сторона реализации физиотерапевтического процесса гипертермии, включая стратегию лечения раковых опухолей. Выполнен анализ антенн-аппликаторов, прикладываемых к телу, работающих на частоте 434 МГц и более низких частотах. Приведены расчеты распределения удельной мощности поглощения электромагнитного поля, излучаемого аппликатором – SAR (Specific Absorption Rate) в плоскости апертуры аппликатора. Приводится решение уравнения теплопроводности для получения температуры в каждой точке пространства биологического объекта. Выполнены расчеты статической и динамической (изменяемой) температуры в характерных точках.

**Ключевые слова:** высокочастотная гипертермия опухолей, биологические объекты (БО), антенные модули, аппликаторы, фазированная антенная решетка, удельная мощность поглощения, SAR.

---

**Введение.** В [1] представлены результаты многолетних экспериментальных и клинических исследований использования искусственных гипертермических и гипергликемических воздействий для повышения эффективности комплексного лечения онкологических больных. Этим задачам посвящены также публикации и документы, изданные в конце 20 века [2-6].

Гипертермическая система [3], предназначенная для реализации гипертермии (перегрева) тела человека, должна состоять из антенной системы с регулировкой мощности возбуждения отдельных элементов, для концентрации излучения в заданной области пациента на требуемой глубине.

Поскольку в процессе гипертермии клинический исход зависит от достигнутых температур опухоли, важно осуществлять контроль за распределением температуры и получать как можно больше информации о температуре в биологическом пространстве во время лечения. Для этого необходимо получать точные координаты тканей конкретного пациента, а также его картину его кровеносной системы. Эти характеристики можно получить, если обработать результаты компьютерной или магнитно-резонансной томографии, которую пациент обязательно проходит перед началом лечения. Эти данные дадут возможность провести процедуру планирования лечения и оценить эффективность применения разных подходов лечения. Однако, возможность компьютерного моделирования лечения не освобождает от обязательства проводить измерение температуры, так как позволяет обнаружить нежелательные «горячие точки» температуры, и дает возможность в режиме реального времени корректировать амплитудно-фазовое распределение поля, формируемое антенной системой.

Стратегия лечения злокачественных опухолей. Результаты многих радиобиологических исследований и медицинских заключений показывают, что гипертермия существенно увеличивает чувствительность раковых клеток к ионизирующему облучению и ряду противоопухолевых лекарственных средств, а при

температурах выше 43 °С происходит тепловое необратимое повреждение раковых клеток. Эти клетки из-за низкого объемного кровотока в гипоксических участках опухоли подвергаются дополнительному нагреванию. Вследствие сочетания методов, применяемых в медицине, гипертермия является одним из наиболее перспективных модификаторов, особенно при лечении радиорезистентных опухолей [7, 8].

Электромагнитные воздействия предпочтительны, по сравнению с другими физическими методами создания повышенной температуры в определенном объеме тела, благодаря поглощению электромагнитной энергии не только в поверхностных, но и в глубоко расположенных биологических тканях. Вследствие этого рост температуры на глубине тканей [9] происходит не только за счет передачи тепла от поверхности вовнутрь за счет теплопроводности, но и, в основном, вследствие преобразования энергии ЭМ волн в тепло непосредственно в каждой точке облучаемого объема. Это позволяет снять проблему тепловой перегрузки (ожогов) кожного покрова путем его охлаждения, и, в то же время, обеспечить создание гипертермического режима в опухолевых тканях на уровне (42-44) °С. Цикл работы системы гипертермии показан на рис. 1.

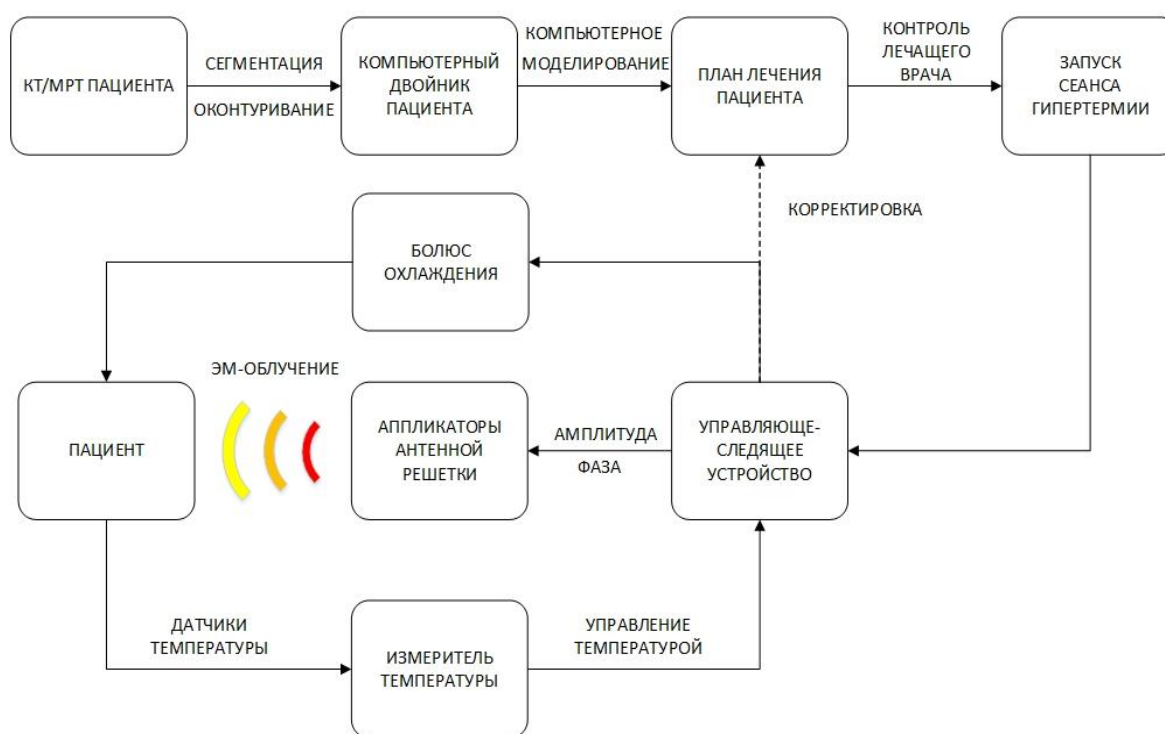


Рис. 1. Стратегия сеанса гипертермии с синхронным слежением за процессом нагрева на компьютерной установке

В качестве исходных данных для планирования лечения требуется компьютерная или магнитно-резонансная томография пациента (КТ/МРТ). После процедуры сегментации и оконтуривания тканей в интересующих областях, получаем компьютерный двойник пациента в формате Voxel. После предварительного компьютерного моделирования с анатомически точной моделью пациента, вычисляются напряженность электрического поля, SAR [3, 10, 11] и температурное распределение в модели, на основе которого оценивается эффективность нагрева опухолевой мишени с помощью имеющегося аппликатора и составляется план лечения в соответствии с рекомендациями лечащего врача.

После принятия решения о плане лечения, происходит запуск сеанса гипертермии. Управляюще-следящее устройство запускает ВЧ-генератор в соответствии с амплитудами и фазами, полученными в результате компьютерного моделирования, и передает мощность на аппликаторы антенной решетки. Управляющее устройство регулирует температуру болюса охлаждения, чтобы не допустить перегрева тканей на поверхности и, как следствие, ожогов. В процессе облучения пациента измеритель температуры с помощью датчиков получает распределение температурного поля внутри пациента в районе опухоли и передает данные на следящее устройство, которое автоматически корректирует план лечения, изменяя набор значений амплитуд и фаз.

Каждый этап данного плана имеет множество теоретических и практических нюансов, например, выбор частоты облучения, недостаточная глубина проникновения современных аппликаторов, построение и моделирование кровеносной системы, получение карты тканей пациента, а разработка, анализ и экспериментальное исследование каждого этапа данного плана является сложной задачей.

В настоящее время в мире разрабатываются и модернизируются отдельные части этой системы, и доведение каждой составляющей до нужного уровня – это дело ближайших десятилетий. Число публикаций по этим вопросам резко увеличивается, начиная со второй половины 20 века.

**Выбор частоты для воздействия на БО.** Создание электронных ламп, клистронов, магнетронов большой мощности в совокупности с исследованием вредного воздействия на организм человека ЭМ излучения, привело к изучению нагрева биологических объектов при поглощении излучаемой мощности в диэлектрической среде с потерями [2]. Исследования показали, что в диапазоне метровых, дециметровых и СВЧ наибольший интерес вызывают частоты:

- разрешенная медицинская частота 2.45 ГГц;
- частота сотовой телефонии 0.9 ГГц, 1.8 ГГц;
- частоты 40 МГц, 434 и 915 МГц, на которой создаются медицинские приборы типа «Яхта» НПО «Исток»;
- системы магнитно-резонансной терапии МРТ (60 МГц). Особенно большой интерес эти системы вызвали при борьбе с Ковид-19, когда МРТ принесла большую пользу при оценке степени потемнении легких больного человека;
- ультразвуковое воздействие (30 кГц и выше) УЗИ;
- инфракрасное излучение 100 ТГц;
- световое облучение 400 ТГц -600 ТГц;
- ультрафиолетовое облучение.

Расчет воздействия ЭМ излучения на биологическое тело с высокой степени точности начался с появлением программ мультифизического анализа СВЧ структур. Наиболее известными САПР являются программы CST SUITE и программа Comsol Multyphysics. Расчеты удельной мощности поглощения SAR [5-8], выполненные с помощью программы CST SUITE, дают возможность оценить поглощение мощности и преобразование этой энергии в тепло при частотах 13 МГц, 40 МГц, 70 МГц и 430 МГц [12].

Моделируя падение плоской волны на биообъект «мышца» размерами 200\*200\*200 мм покажем (рис. 2), что максимальное значение SAR находится на границе падения плоской волны и уменьшается по мере уменьшения частоты. Чтобы оценить скорость затухания волн с разными частотами, выполним нормировку зависимостей SAR, рассчитанной вдоль линии удаления от источника ЭМ излучения.

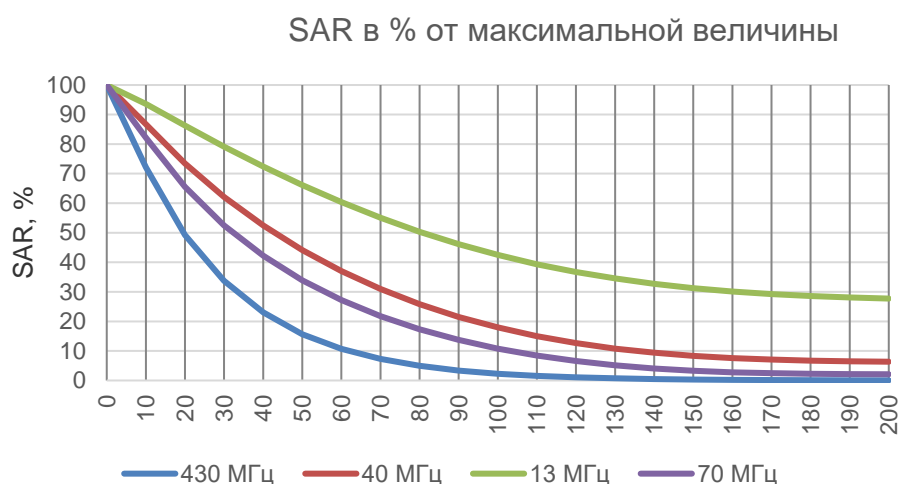


Рис. 2. Изменение нормированной SAR вдоль линии при падении плоской волны на БО типа «мышца»

Из рис. 2 видно, чем меньше частота ЭМ облучения, тем меньшему затуханию подвержена ЭМ-волна и тем глубже можно прогреть ткани пациента. Эти зависимости не зависят от мощности и от согласования с нагрузкой, поэтому позволяют оценить проникновение волны без других факторов. Поскольку проникаемость и другие характеристики биологических объектов (БО) зависят от частот, эти зависимости нужно учитывать в расчете температуры, которая может быть рассчитана как в пространстве БО, так и вдоль секущих линий.

**Модели биообъектов.** На первом этапе применения САПР для моделирования и расчета температуры в био-объектах, применялись многослойные модели [9]. По мере развития науки исследования биологического тела были разработаны Voxel модели - усредненная модель человеческого тела, в которой задаются электромагнитные свойства каждой точки в пространстве тела человека.

Модель, выполненная в виде отдельных пикселей с заданными проникаемостью и потерями (модель Voxel) биологических структур используется в самых различных областях радиотерапии, ядерной медицины и изучения воздействия электромагнитных полей (рис. 3). Томографические методы медицинской визуализации позволяют строить трехмерные модели, основываясь на анатомических особенностях каждого человека. Это воксельные модели, томографические модели, фантомные или томографические воксельные взаимозаменяемые модели [11]. Их преимущества заключаются в точном представлении человеческой анатомии.

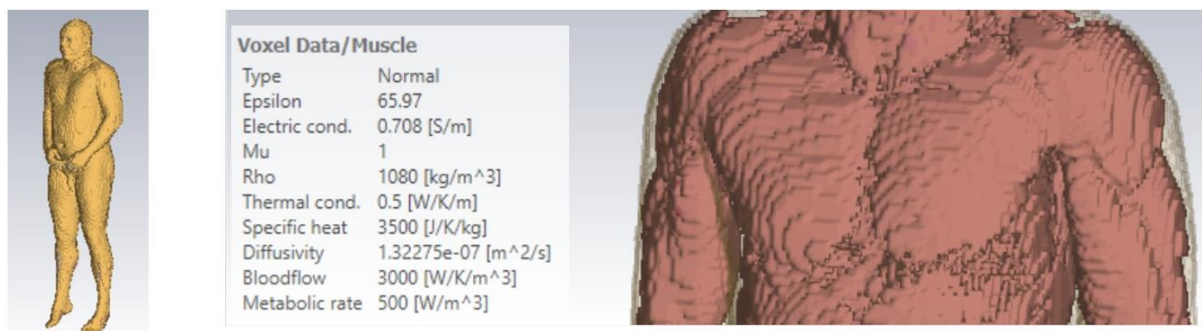


Рис. 3. Модель человека, разбиваемая на ячейки при создании Voxel модели (шаблона) (справа Voxel модель выделенной части тела (мускулы))

Электромагнитные (проницаемость, проводимость) и температурные (термоёмкость, теплопроводность) характеристики каждой клетки Voxel модели – предмет многих медицинских исследований.

Импорт биологических моделей тела человека можно выполнить из современных САПР, типа CST SUITE и Comsol Multiphysics [13]. Таким образом, пользователь, а также создатель системы лечения раковых опухолей может выбрать эти модели, опираясь на расчетные возможности.

Известно, что данные, закладываемые в VOXEL моделях, получены при статистической обработке данных на основании многих, в том числе медицинских источников. В расчетах важно понять, какую точность электрических и тепловых характеристик можно допустить при исследовательских, а также лечебных расчетах.

**Расчет SAR и температуры в теле человека.** Расчет электромагнитного поля в биологической среде с потерями выполняется численными методами, определяя в пространстве БО поле, и потери мощности. Основными характеристиками оценки поглощения мощности в БО является SAR (Specific Absorbion Rate), а также приращение температуры в пространстве БО. Для расчета SAR в программе CST нужно задать монитор потерь мощности для расчета величины SAR и полей.

Скорость удельного поглощения мощности SAR определяется как производная по времени увеличения энергии  $dW$ , поглощаемой (рассеиваемой) приращаемой массой  $dm$  в элементарном объеме  $dV$  с заданной плотностью массы  $\rho$ :

$$SAR = \frac{d}{dt} \left( \frac{dW}{dm} \right) = \frac{d}{dt} \left( \frac{dW}{\rho dV} \right),$$

где величина SAR имеет размерность Вт/кг.

Карта распределения температуры в БО отличается от карты распределения SAR из-за того, что на распределение температуры значительно влияют теплопроводность и теплоемкость материала. Поэтому важно исследовать связь между распределением SAR и распределением установившейся температуры для разных аппликаторов.

Реализованные в CST и Comsol Multiphysics алгоритмы, позволяют выполнить расчет установившегося и динамически изменяемых тепловых потоков, используя уравнение переноса тепла [2]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + MR + \rho \cdot SAR + \xi \rho_b C_b (T_a - T), \quad (1)$$

где  $\rho$  - плотность биологического материала,  $C_p$  - теплоемкость биологического материала,  $\lambda$  - теплопроводность материала,  $MR$  (*metabolic Rate*) - скорость генерации тепла в соответствии с метаболическими процессами,  $SAR$  - удельная мощность поглощения, которая также записывается в виде:

$$SAR = \frac{\sigma |E|^2}{2\rho},$$

где:  $\sigma$  (С/м) электропроводность и  $\rho$  (кг/м<sup>3</sup>) плотность ткани,  $\xi$  - скорость диффузии (распространения) тепла,  $\rho_b$  - плотность массы крови,  $C_b$  - теплоемкость биологического материала,  $T_a$  - артериальная температура = 37.2°C это температура крови,  $T$  - поле температуры в пространстве БО.

Таким образом, последнее слагаемое в (1) характеризует теплоотвод за счет температуры крови. Выражение  $\nabla \cdot (\lambda \nabla T)$  представляет собой величину, пропорциональную распространению тепла во всех направлениях ткани. Каждое слагаемое в (1) имеет смысл и размерность поглощаемой мощности в единице объема ( $\text{Вт}/\text{м}^3$ ).

**Создание и моделирование антенны-аппликатора.** В настоящее время рупорные или волноводные полые, а также гибкие микрополосковые аппликаторы широко используются в клиниках для процедур гипертермии. Контактные гибкие микрополосковые аппликаторы [14] являются эффективным и удобным инструментом для проведения гипертермии при лечении злокачественных опухолей.

Применение одновременной радиотерапии (РТ) и гипертермии (ГТ) связано с рядом проблем [15-17]. Среди них проблема создания простых и удобных в клинической практике аппликаторов. Такие антенны-аппликаторы должны обладать малым коэффициентом поглощения ионизирующего излучения, должны быть радиационно стойкими, не изменять своих параметров при воздействии больших доз ионизирующей радиации, не должны искажать радиационное поле.

Установлено, что при последовательном сочетании гипертермии и лучевой терапии эффективность последней увеличивается в среднем в 1,5 раза. Этот эффект подтвержден в многочисленных международных исследованиях, проведенных в Беларуси, России, США, Германии, Италии, Англии, Нидерландах, Франции и др. [3, 7-9]. Имеется информация, полученная в эксперименте, что при одновременном их проведении эффективность лучевой терапии повышается дополнительно в 2,5-4 раза [17]. Начиная с 1992 года пионерские работы по внешнему ОВРН (одновременное воздействие гипертермии и лучевой терапии) были проведены в США [4-6]. Исследование различных антенн-аппликаторов (CFMA), а также согнутых, вокруг фантома эллиптической формы, выполняется, чтобы изучить «схему нагрева», используя эффективный размер поля (EPS) и эффективную глубину нагрева (END) различных аппликаторов. Моделирование для плоских CFMA всех типов было выполнено, чтобы сравнить EFC и END для плоских и изогнутых аппликаторов. Антенна выполняется на фторопластовой подложке толщиной 1,5 мм, расположенной между активными электродами и электрическим экраном толщиной 2 мм. Смоделированная толщина водяного болюса составляла 10 мм, и предполагался полный контакт между резиновым каркасом и электродами.

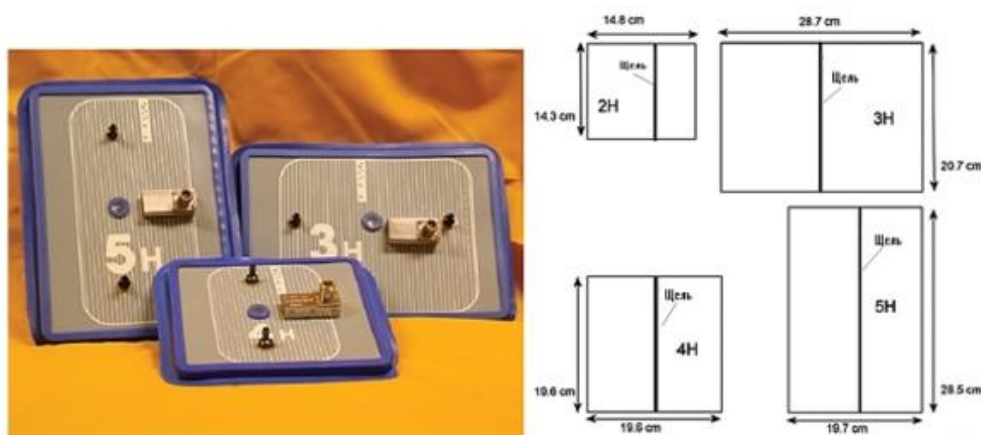


Рис. 4. Фотография и размеры антенн-аппликаторов, выпускаемых НПО «Исток» г. Фрязино Моск. обл. [14] (справа указаны размеры диэлектрической подложки и положение щели возбуждения)





Рис. 5. Монтирование антенны-апликатора на тело пациента

Созданная антенна-апликатор является модернизированной F- антенной, поэтому смещение точки порта от заземленного ребра является эффективным способом согласования антенны. Второй вибратор, связанный с вибратором F- антенны через щель, возбуждается как резонансный элемент и обеспечивает создание максимального поля в центре щели антенны-апликатора.

Модель антенны-апликатора с размерами 5Н в двух секущих плоскостях показана на рис. 6, 7.

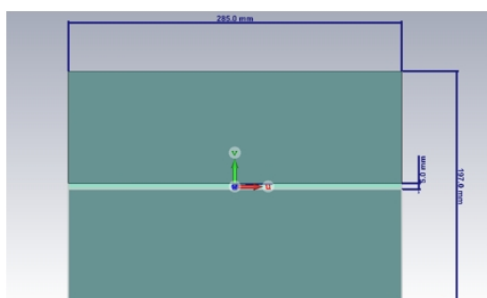


Рис. 6. Вид F-антенны апликатор сверху

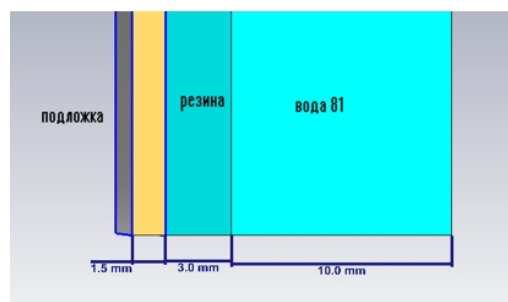


Рис. 7. Слои антенной системы антенны апликатора, включающие воду в болусе для охлаждения кожи пациента

Частотная характеристика коэффициента отражения антенны-апликатора, ненагруженной на биологическую структуру, отличается от частотной характеристики в присутствии БО. Для согласования применяются специальные методы, так, чтобы реальная часть входного импеданса антенны-апликатора была равна импедансу генератора, а мнимая часть – доведена до полной компенсации, до нуля. Это важно для отработки техники настройки антенны-апликатор в присутствии БО с большой проницаемостью и потерями.

Величина приложенной мощности к антенне-апликатору выбирается таким образом, чтобы максимальная температура ткани не превышала максимально допустимую температуру 44°C. Для того, чтобы увеличить глубину прогрева и уменьшить температуру на поверхности, используется водяной болус. Меняя температуру болуса, можно снизить температуру кожи и сместить максимальную температуру тканей в несколько более глубокое место (примерно на глубине 1 см ниже кожи), увеличивая эффективную глубину прогрева. Таким образом, наличие болуса с водой, позволяет увеличить подаваемую на антенну мощность.

Можно считать, что на 3-м шаге лечения (рис. 1) необходимо получить результат решения задачи температурного распределения. Эту задачу можно решать инструментами электромагнитного моделирования, используя программы HFSS, FEKO, CST, COMSOL Multiphysics. Расчет уравнения теплопроводности выполняется алгоритмом программы CST, приближенным к алгоритму расчета электромагнитного поля FDTD. Метод расчета уравнения в частных производных выполняется методом «прыжка лягушки» с шагом интегрирования, связанного с размером параллелепипеда, на который разбита модель БО [11]. Установившаяся температура рассчитывается в CST Thermal Steady State, а динамический процесс рассчитывается во временной области программой CST Thermal Transient.

Алгоритм расчета распределения температуры основывается на расчете электромагнитного поля. Изменение температуры в точках БО при включении источника мощности от 0 до 20 сек и наблюдении процесса изменения температуры от 0 до 200 сек.

Расчеты показывают, что для получения верной картины динамического и статического изменения температуры, нужно найти верные установки для следующих параметров:

- тепловые граничные условия,
- сигнала воздействия на БО (мгновенное включение, включение с задержкой, импульсное включение источника поглощаемой мощности),
- связь потерь, мощности и энергии (мощность \* время).

Расчет временного изменения температуры также важен, как и расчет установившейся стационарной температуры. Приведем результаты расчета установившейся температуры (рис. 8) и динамически изменяемой температуры в точках вдоль линии, пересекающей БО (рис. 9).

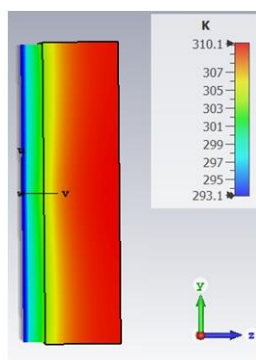


Рис.8. Установившаяся температура в пространстве БО

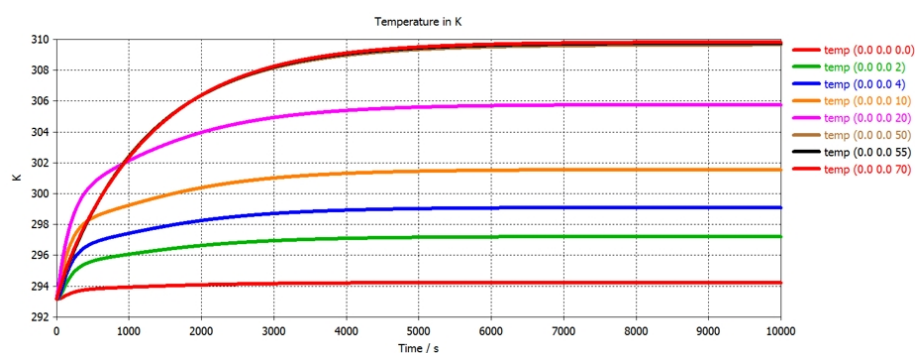


Рис. 9. Динамическое изменение температуры в разных точках БО (Модель Voxel)

Из рис. 8 можно видеть, что при стационарном типе решения температура увеличилась на 17°C, причем вблизи водяного болюса температура не превышает температуру внутри БО. Одной из важных расчетов является способность предсказать температуру внутри БО заключается в расчете распределения температуры по линии прогрева, при различной температуре водяного болюса (рис. 10). Из рис. 10 видим, что на глубине порядка 4-7 см нагрев БО достигает нужных значений (порядка 42°C), при этом избегается перегрев кожи.

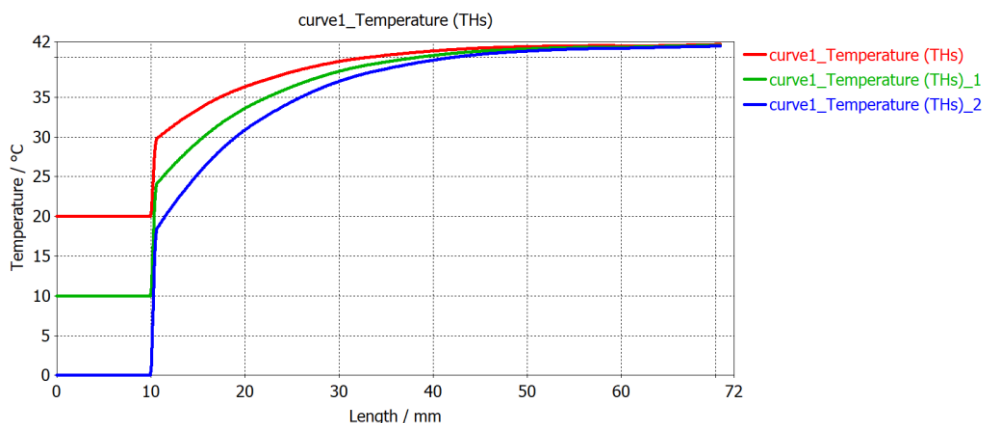


Рис. 10. Установившаяся температура тела при различных температурах водяного болюса

**Искривление антенны-апликатора и влияние этого на характеристики облучения.** Изгиб антенны-апликатора (рис. 11) дает фокусирующий эффект SAR, который ярко выражен при сильной кривизне, но, кроме того, особенно для апликатора 5Н с большими размерами, показал достаточно сильное ослабление поля по краям апликатора, по сравнению с центром.

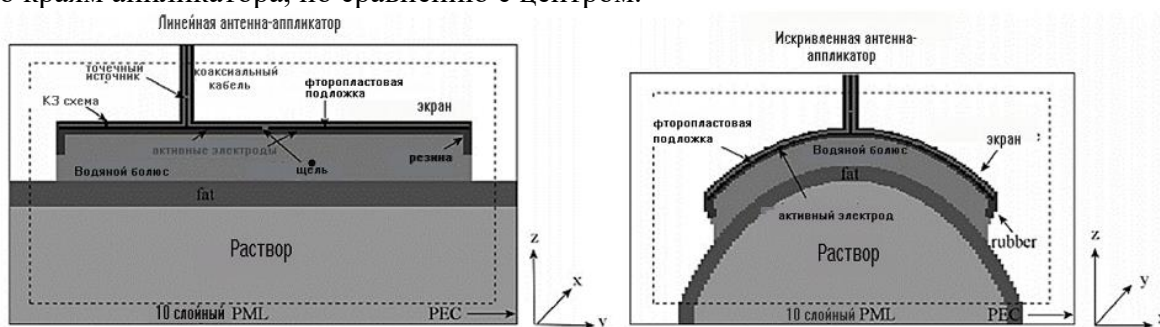


Рис.11. Срезы моделей антенн-апликаторов. Спрямоленная (а) и искривленная (б) антенны, нагруженные на слой раствора, моделирующего биологическое тело.

Эффективный размер области прогрева становится меньше после того, как апликаторы накладываются на искривленную поверхность; и больший эффект получается при сильном искривлении. Эффективная глубина нагрева увеличивается при наложении апликаторов на радиальную поверхность, но процент увеличения глубины сильно зависит от степени искривления.

Решения для поля, поглощенной энергии и температуры прогрева для неискривленной и искривленной антенных систем будут отличаться, причем в искривленной антенне можно добиться большей глубины проникновения прогрева внутрь БО.

Эффективная глубина нагрева электромагнитных волн уменьшается с повышением частоты. Поэтому эксперименты и конкретные приборы создаются в диапазоне от 30 МГц до 2400 МГц.

Согласно рекомендациям по гипертермии, опубликованным Европейским обществом гипертермической онкологии [8], поверхностный нагрев может использоваться при поражениях глубиной до 4 см, исходя из глубины проникновения электромагнитной энергии на применяемых частотах. Однако может оказаться целесообразным нагрев до несколько большей глубины, поскольку изгиб CFMA увеличивает глубину проникновения.

**Создание фазированной антенной решетки (ФАР) как важнейшей части системы поиска и лечения раковых опухолей.** Главным преимуществом ФАР перед другими типами антенн является способность осуществления электронного формирования зоны излучения, необходимой для данной нозологической формы опухоли, по заданному алгоритму. Для этого нужно осуществить заданное распределение токов в плоскости ФАР, что достигается путем использования специальной системы питания антенны.

В ФАР формирование и перемещение зон тепловыделения в пространстве биологической ткани осуществляется путем введения постоянных или переменных фазовых сдвигов между сигналами, излучаемых отдельными модулями (рис. 12). Когда расположенные рядом источники излучают энергию одновременно на одной и той же частоте с одинаковой фазой (синфазное возбуждение), то излучающие из этих источников волны складываются. Если волны находятся не в фазе, то результирующий сигнал будет ослабленным или (при сдвиге фаз  $180^\circ$ ) равным 0.

В синфазном случае антенна формирует однородную зону излучения, приближающуюся к плоской волне и, значит, будут исключены «горячие точки» и глубина проникновения будет максимально возможной для этой частоты (рис. 13). Если же фазовые соотношения волн изменять по определенному закону, то можно получать сканирование зоны суммарного электромагнитного поля в ближней зоне излучения в пространстве биологической ткани. Физические принципы, лежащие в основе формирования интерференционных картин, позволяют определять размеры зоны тепловыделения.

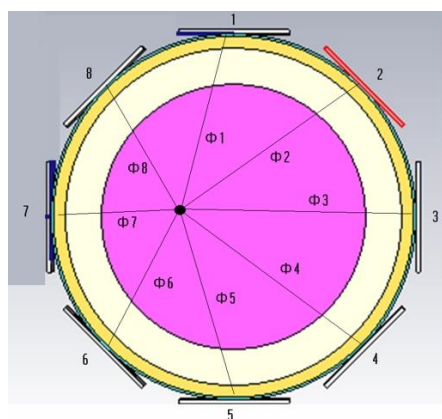


Рис. 12. Антенная решетка расположенная вокруг БО

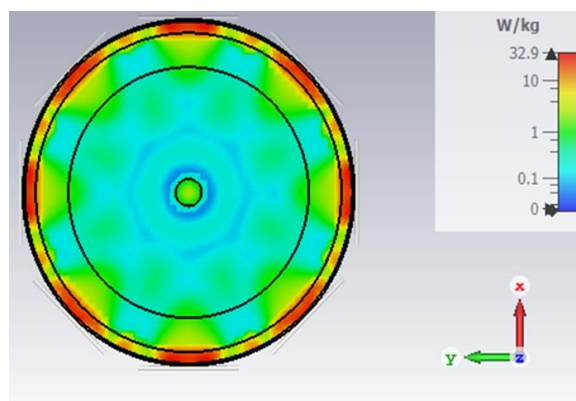


Рис. 13. SAR в сечении многослойного БО (вода, кожа, жир, мясо)

Индивидуальные для пациента антенные решетки из отдельных микрополосковых антенн-аппликаторов помещаются в корпус с системой водяного охлаждения, контактирующей с поверхностью кожного покрова. Для получения высокой однородности или необходимой геометрии суммарного излучаемого поля, необходимо управлять электромагнитными полями отдельных антенн. Для этого производятся изменения амплитудно-фазовых соотношений излучающих волн, которые формируют ближнее поле излучения (рис. 13).

**Выводы.** Применение планирования лечения при гипертермии поверхностно расположенных опухолей отстает из-за отсутствия достаточно надежных методов реконструкции положения антенн-аппликаторов относительно анатомии, которые требуют лучшее пространственное разрешение на частотах, используемых для поверхностной гипертермии (обычно 434 и 915 МГц). Предложенный метод позволяет

клинически использовать планирование лечения гипертермией для дальнейшей оптимизации качества лечения поверхностным нагревом, что важно с учетом соотношения тепловой дозы и эффекта. Моделирование может помочь оптимизировать процесс лечения, оптимизируя подаваемую мощность и температуру водяного болюса. Кроме того, планирование лечения также может быть применено для определения того, возможно ли эффективное нагревание определенной опухолевой мишени с относительно глубокой инфильтрацией с помощью имеющегося аппликатора для гипертермии.

Для надежного планирования лечения с учетом типа аппликатора, ориентация аппликатора во время сеансов лечения должна быть одинаковой с манекен-аппликатором на КТ-сканировании перед лечением. Преимуществом использования системы отслеживания положения была бы возможность обратной связи в режиме реального времени об ошибке позиционирования, что позволило бы более точно изменять положение при последующих сеансах лечения. Оценка различных методов точного и воспроизводимого позиционирования является предметом продолжающихся исследований.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Применение гипертермии и гипергликемии при лечении злокачественных опухолей / Н. Н. Александров, Н. Е. Савченко, С. З. Фрадкин, Э. А. Жаврид. – М.: Медицина, 1980. – 256 с.
2. Девятков, Н. Д. Влияние электромагнитного излучения миллиметрового диапазона волн на биологические объекты / Н. Д. Девятков // Успехи физических наук. – 1973. – Т. 110. – № 3. – С. 453-454.
3. Barnes, F. S. Bioengineering and Biophysical Aspect of Electromagnetic Fields / F. S. Barnes, B. Greenebaum. – CRC Press, 2006. – 440 p.
4. Prasad, V. Role of Simulations in the Treatment Planning of Radiofrequency Hyperthermia Therapy in Clinics / V. Prasad, J. Kim, S. Kim // Journal of Oncology. – 2019. – V. 2019. – DOI: 10.1155/2019/9685476.
5. Kok, H. P. Planning, optimisation and evaluation of hyperthermia treatments. / H. P. Kok, A. N. T. J. Kotte, H. Crezee // International Journal of Hyperthermia. – 2017. – V. 33. – DOI: 10.1080/02656736.2017.1295323.
6. Pennes, H. H. Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting human fore arm / H. H. Pennes // Journal of applied physiology. – 1948. – V. 1(2). – P. 93–122. – DOI: 10.1152/jappl.1948.1.2.93.
7. Field, S. B. An Introduction to the Practical Aspects of Clinical Hyperthermia / S. B. Field, J. W. Hand. – New York: Taylor & Francis, 1990. – 572 p.
8. Treatment Planning and Modelling in Hyperthermia: A Task Group Report of the European Society for Hyperthermic Oncology / ESHO Task group Committee // – Rome, Italy: Tor Vergata, 1992.
9. Gabriel, C. The dielectric properties of biological tissues: I. Literature survey / C. Gabriel, S. Gabriel, E. Corthout // Physics in Medicine & Biology. – 1996. – V. 41(11). – P. 2231–2249.
10. A HF EM installation allowing simultaneous whole body and deep local EM hyperthermia / V. N. Mazokhin, D. N. Kolmakov, N. A. Lucheyov [et al] // International Journal of Hyperthermia. – 1999. – V. 15(4). – P. 309–329.
11. Курушин, А. А. Расчет теплового поля в биологических объектах под воздействием СВЧ излучения / А. А. Курушин. – М.: One-Book, 2015. – 403 с.
12. Van Rhon, G. C. A 433 MHz Lucite cone waveguide applicator for superficial hyperthermia / G. C. Van Rhon, P. J. Rietveld, J. Zee // International Journal of Hyperthermia. – 1998. – V. 14(1). – P. 13–27.
13. SAR deposition by curved CFMA-434 applicators for superficial hyperthermia: Measurements and simulations / H. P. Kok, D. Correia, Martijn D. G. [et al.] // International Journal of Hyperthermia. – 2010. – V. 26(2). – P. 171–184.
14. Gelvich, E. A. Contact flexible microstrip applicators (CFMA) in a range from microwaves up to short waves / E. A. Gelvich, V. N. Mazokhin // IEEE transactions on bio-medical engineering. – 2002. – V. 49(9). – P. 1015–1023.
15. Overgaard, J. The current and potential role of hyperthermia in radiotherapy / J. Overgaard // International Journal of Radiation Oncology, Biology & Physics. – 1989. – V 16. – № 3. – P. 538-549.
16. Radiotherapy with and without hyperthermia in the treatment of superficial localized breast cancer: results from five randomized control trials / C. C. Vernon, J. W. Hand, S. B. Field [et al.] // International Journal of Radiation Oncology, Biology & Physics. – 1996. – V. 35. – № 4. – P. 731-744. – DOI: 10.1016/0360-3016(96)00154-x.
17. Hyperthermia in combined treatment of cancer / P. Wust, B. Hildebrandt, G. Sreenivasa [et al.] // The Lancet Oncology. – 2002. – V. 3. – № 8. – P. 487–497. – DOI: 10.1016/s1470-2045(02)00818-5.

*Поступила в редакцию 02.08.2024 г., рекомендована к печати 26.08.2024 г.*

**RADIO-TECHNICAL SYSTEM FOR TREATMENT OF CANCEROUS TUMORS**

*Mazokhin V.N., Ulasov G.A., Kurushin A.A.*

The positive and negative effects of the electromagnetic field on the biological body remains an extremely relevant issue. One of the positive effects of irradiation of biological objects is the warming up of individual parts of the body. Hyperthermia (warming up) is an essential aspect in the treatment of cancerous tumors. The article discusses the radio engineering side of the implementation of the physiotherapeutic process of hyperthermia, including the strategy for the treatment of cancerous tumors. The analysis of antenna applicators applied to the body, operating at a frequency of 434 MHz and lower frequencies, was performed. Calculations of the distribution of the specific absorption power of the electromagnetic field emitted by the applicator – SAR (Specific Absorption Rate) in the plane of the applicator aperture are presented. The solution of the thermal conductivity equation is given to obtain the temperature at each point in the space of a biological object. Calculations of static and dynamic (variable) temperatures at characteristic points are performed.

**Keywords:** high-frequency hyperthermia of tumors, biological objects (BO), antenna modules, applicators, phased array antenna, specific absorption power, SAR.

**Мазохин Владимир Николаевич**

начальник лаборатории НПП «Исток» им. А.И. Шокина,  
Российская Федерация, г. Фрязино.  
E-mail: gaulasov@istokmw.ru

**Mazokhin Vladimir Nikolaevich**

Head of the laboratory of SPE «Istok» named after A.I. Shokin  
Russian Federation, Fryazino.

**Уласов Глеб Алексеевич**

инженер 2 категории НПП «Исток» им. А.И. Шокина,  
Российская Федерация, Московская обл., г. Фрязино.  
E-mail: smesher96@gmail.com

**Ulasov Gleb Alekseevich**

Engineer of the 2nd category of SPE «Istok» named after A.I. Shokin,  
Russian Federation, Fryazino.

**Курушин Александр Александрович**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры радиотехнических приборов и антенных систем ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет "Московский Энергетический Институт"»,  
Российская Федерация, г. Москва.  
E-mail: kurushin@mail.ru

**Kurushin Aleksandr Aleksandrovich**

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Associate Professor at Department of Radio Technical Devices and Antenna Systems of Moscow Power Engineering Institute,  
Russian Federation, Moscow.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИEDN XFELXE  
УДК 004.4

DOI 10.5281/zenodo.14018532

ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ОТЧЁТА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ  
ПРОВЕРКИ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ НА ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ  
ПЕРЕСЕЧЕНИЯ

© 2024 Левина Т.М., Муталлапов Р.Н., Ушаков А.С.

Приведено описание работы разработанного программного модуля формирования проверок трехмерной модели на пространственные пересечения, а также отчёта по результатам сформированных проверок. Описана архитектура программного модуля.

**Ключевые слова:** программный модуль, формирование, отчёт, пространственные пересечения, трехмерная модель.

**Введение.** С каждым годом количество компаний и проектов, использующих технологии информационного моделирования увеличивается [1]. С ростом внедрения и использования этих технологий возрастает и сложность проектируемых трехмерных моделей, а также количество различных элементов в них, что способствует появлению ошибочных пространственных пересечений. Для их обнаружения используются различные программные продукты. Самым популярным на сегодняшний день является Autodesk Navisworks [2]. Проведение проверок на пространственные пересечения и получение отчёта также может значительно сократить затраты на изменение проекта в ходе строительства, что сэкономит деньги и время.

Формировать отчёты о проверках на пространственные пересечения можно и в самом Navisworks без дополнительных программных модулей (рис. 1).

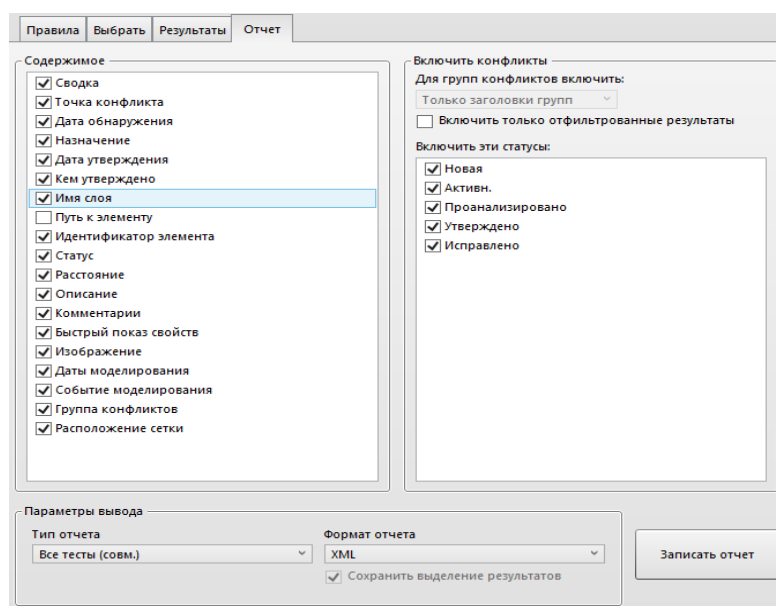


Рис. 1. Стандартная функция формирования отчётов

Использование программных модулей может повысить как точность проверок на пространственные пересечения за счёт сокращения количества выполняемой человеком работы, так и сократить затрачиваемое на это время, например за счёт возможности настройки запуска модуля различными способами, что позволит проводить проверки даже больших трехмерных моделей в нерабочее время [3].

**Описание разработанного программного модуля.** Разработанный программный модуль не имеет интерфейса для взаимодействия с пользователем, однако им можно воспользоваться как из Navisworks, так и с помощью отдельно созданного «.exe» файла. Для запуска в Navisworks необходимо в «ленте инструментов» выбрать пункт «Надстройки инструментов 1» и запустить модуль нажатием на кнопку «Clash Support». Пользователю необходимо будет выбрать матрицу коллизий и местоположение, куда модуль сохранит результаты работы (рис. 2).

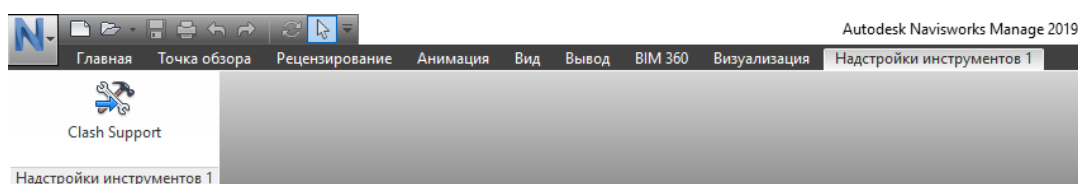


Рис.2. «Лента инструментов» Navisworks

Для запуска программного модуля вне программного продукта нужно передать аргументы в «.exe» файл, который проведёт процедуру создания проверок, их запуска, а также формирования отчёта без участия пользователя (рис. 3).

```

Администратор: Командная строка
Microsoft Windows [Version 10.0.19045.4170]
(c) Корпорация Майкрософт (Microsoft Corporation). Все права защищены.

C:\Windows\system32>cd /d D:\navisplugins1\InvokePluginClashTest\bin\Debug\InvokePluginClashTest

D:\navisplugins1\InvokePluginClashTest\bin\Debug\InvokePluginClashTest>InvokePluginClashTest.exe "C:\Users\wfpro\OneDrive\Рабочий стол\TestExport\1151-2.nwd" "C:\Users\wfpro\OneDrive\Рабочий стол\TestExport\Test.xlsx" "C:\Users\wfpro\OneDrive\Рабочий стол\TestExport\result"

[LOG] Запуск работы...
[LOG] Открытие модели C:\Users\wfpro\OneDrive\Рабочий стол\TestExport\1151-2.nwd...
[LOG] Модель открыта
[LOG] Вызов плагина...
[LOG] Плагин завершил работу
[LOG] Сохранение нового файла 3D-модели в C:\Users\wfpro\OneDrive\Рабочий стол\TestExport\result...
[LOG] Файл сохранён
[LOG] Зкрытие NavisWorks...
[LOG] NavisWorks закрыт
[LOG] Завершение работы...

D:\navisplugins1\InvokePluginClashTest\bin\Debug\InvokePluginClashTest>

```

Рис. 3. Запуск программного модуля с помощью командной строки

Для запуска необходимо указать исполняемый файл «InvokePluginClashTest.exe» и три аргумента:

- полный путь до файла со сводной трехмерной модели;
- полный путь до Excel-файла с матрицей коллизий;
- полный путь до папки, в которую будет выгружен результат работы программного модуля (рис. 4).



Имя	Дата изменения	Тип	Размер
Clash_Report_11.05.11.55.xlsx	11.05.2024 11:55	Лист Microsoft Ex...	20 КБ
LOG_Clash_Detective_11.05.11.55.txt	11.05.2024 11:55	Текстовый докум...	1 КБ
NewClashModel_11.05.11.55.nwd	11.05.2024 11:55	Navisworks Docu...	8 КБ

Рис. 4. Папка, в которую выгружен результат работы программного модуля

Как видно на рис. 4, в результате выполнения программного модуля формируется три файла:

- отчёт о пространственных пересечениях;
- «лог-файл», в котором описан ход выполнения программного модуля. В случае возникновения исключения, можно будет узнать в чём причина;
- новый файл с трехмерной моделью, в которой уже созданы проверки на пространственные пересечения.

В названиях файлов также указывается дата и время их формирования в формате «ДД.ММ\_чч.мм».

Возможность запуска с помощью «.exe» файла позволит гибко настраивать программный модуль. Например, можно настроить его работу в «Планировщике заданий», находящимся в операционной системе Windows. Это позволит запускать работу модуля в необходимые промежутки дат и времени, например когда сотрудников нет на рабочем месте и вычислительные мощности относительно свободны.

**Описание архитектуры программного модуля.** На рис. 5 представлена архитектура разработанного программного модуля.

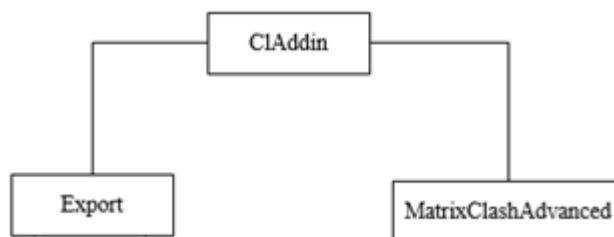


Рис. 5. Архитектура программного модуля

В методе «MatrixClashAdvanced» описана логика считывания данных из матрицы коллизий, создания проверок на пространственные пересечения и запуск всех проверок. Матрица коллизий представляет собой Excel документ с расположенными в нём в виде матрицы названиями групп элементов трехмерной модели (рис. 6).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1				1151	1151	1151	1151	1152	1152	1152	1152
2				300	300	410	410	420	420	450	450
3				КМ	КС	БР	ЭО	ТР	ПРТ	СТ	СС
4	1151	300	КМ	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1151	300	КС	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1151	410	БР	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1151	410	ЭО	1	1	1	1	1	1	1	1
8	1152	420	ТР	1	1	1	1	1	1	1	1
9	1152	420	ПРТ	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1152	450	СТ	1	1	1	1	1	1	1	1
11	1152	450	СС	1	1	1	1	1	1	1	1

Рис. 6. Матрица коллизий

Матрица коллизий необходима, так как модель может состоять из тысяч и десятков тысяч различных элементов, что делает процесс формирования проверок через встроенные возможности Navisworks неэффективным и трудозатратным.

В методе «Export» описан порядок запуска связанных методов для экспорта результатов проверок в Excel документ в формате отчёта.

**Описание работы метода «Export».** Архитектура метода «Export» представлена на рис. 7.

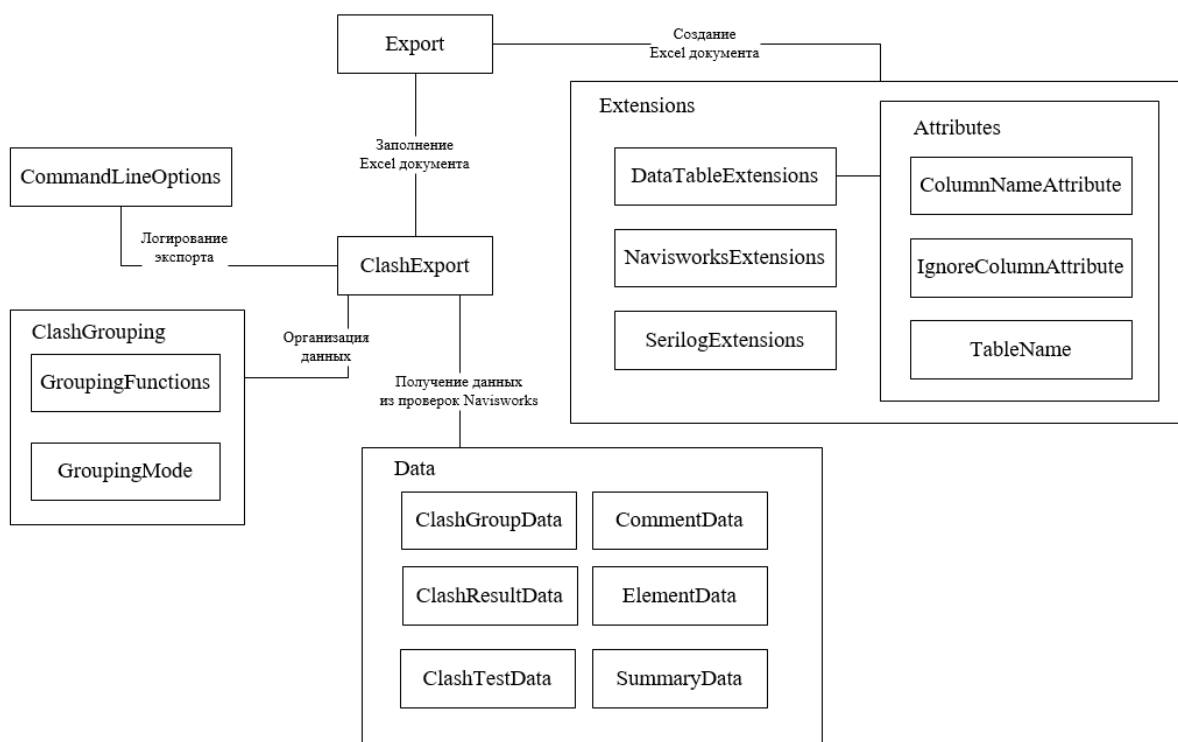


Рис. 7. Ахитектура модуля «ClashExporter»

Вызвав метод «Export», происходит извлечение данных из Navisworks. Полученные данные организуются, затем создаётся Excel документ, в который они записываются. В процессе выполнения метода «Export» происходит «логирование», то есть фиксация происходящих событий, в том числе и исключений. «Лог-файл» представлен на рис. 8.

```

Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
[LOG] 10.05_15.13: Запуск работы...
[LOG] 10.05_15.14: Открытие модели C:\Users\OneDrive\Рабочий стол\TestExport\1151-2.nwd...
[LOG] 10.05_15.14: Модель открыта
[LOG] 10.05_15.14: Вызов плагина...
[LOG] 10.05_15.14: Плагин завершил работу
[LOG] 10.05_15.14: Сохранение нового файла 3D-модели в C:\Users\OneDrive\Рабочий стол\TestExport\result...
[LOG] 10.05_15.14: Файл сохранён
[LOG] 10.05_15.14: Зкрытие NavisWorks...
[LOG] 10.05_15.14: NavisWorks закрыт
[LOG] 10.05_15.14: Завершение работы...
    
```

Рис. 8. Записи в лог-файле

Вид сформированного отчёта представлен на рис. 9.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Test Name	New	Active	Reviewed	Approved	Resolved	Total
2	КМ и КС	0	0	0	0	0	0
3	БР и КМ	1	0	0	0	0	1
4	КМ и ЭО	1	0	0	0	0	1
5	КМ и ТР	0	0	0	0	0	0
6	КМ и ПРТ	0	0	0	0	0	0
7	КМ и СТ	0	0	0	0	0	0
8	КМ и СС	0	0	0	0	0	0
9	БР и КС	0	0	0	0	0	0
10	КС и ЭО	0	0	0	0	0	0
11	КС и ТР	0	0	0	0	0	0
12	КС и ПРТ	0	0	0	0	0	0
13	КС и СТ	0	0	0	0	0	0
14	КС и СС	0	0	0	0	0	0
15	БР и ЭО	1	0	0	0	0	1
16	БР и ТР	0	0	0	0	0	0
17	БР и ПРТ	0	0	0	0	0	0
18	БР и СТ	0	0	0	0	0	0
19	БР и СС	0	0	0	0	0	0
20	ТР и ЭО	0	0	0	0	0	0
21	ПРТ и ЭО	0	0	0	0	0	0
22	СТ и ЭО	0	0	0	0	0	0
23	СС и ЭО	0	0	0	0	0	0
24	ПРТ и ТР	0	0	0	0	0	0
25	СТ и ТР	0	0	0	0	0	0
26	СС и ТР	0	0	0	0	0	0
27	ПРТ и СТ	0	0	0	0	0	0
28	ПРТ и СС	1	0	0	0	0	1
29	СС и СТ	0	0	0	0	0	0
30							
31							
32							
33							
34							
35							
36							

Рис. 9. Сформированный отчёт

В документе сформировано пять листов:

- «Tests Summary». На данном листе указывается количество пространственных пересечений с различными статусами по результатам проверок;
- «Clash Tests». На данном листе представлены связанные результаты проверок на пространственные пересечения;
- «Clash Results». На данном листе представлены данные о проверках на пространственные пересечения;
- «Elements». На данном листе представлены данные об элементах и их родительских моделях;
- «Comments». На данном листе представлены данные о комментариях к проверкам на пространственные пересечения.

**Выводы.** Разработанный программный модуль можно использовать в различных ситуациях за счёт наличия нескольких способов его запуска. Повышается и точность формируемых проверок на пространственные пересечения за счёт использования матрицы коллизий. Также корректно сформированный отчёт с настроенными «умными таблицами» позволит взаимодействовать с ним более эффективно, что также влияет на скорость реализации проекта.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Информационное моделирование зданий и сооружений [Электронный ресурс] / Tadviser. – URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/BIM\\_-\\_Информационное\\_моделирование\\_зданий\\_и\\_сооружений](https://www.tadviser.ru/index.php/BIM_-_Информационное_моделирование_зданий_и_сооружений) (дата обращения 04.04.2024).
2. BIM в России [Электронный ресурс] / Tadviser. – URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:BIM-технологии\\_%28рынок\\_России%29](https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:BIM-технологии_%28рынок_России%29) (дата обращения 06.04.2024).
3. BIM в России и СНГ 2023: результаты большого опроса [Электронный ресурс] / Muratovbim. – URL: <https://muratovbim.pro/blog/bim-v-rossii-i-sng-2023-rezultaty-bolshogo-oprosa/> (дата обращения 07.04.2024).

*Поступила в редакцию 11.05.2024 г., рекомендована к печати 03.06.2024 г.*

**SOFTWARE MODULE FOR GENERATING A REPORT ON THE RESULTS OF CHECKS  
OF A 3D-MODEL FOR SPATIAL INTERSECTIONS**

*Levina T.M., Mutallapov R.N., Ushakov A.S.*

The description of the work of the developed software module for the formation of checks of a three-dimensional model for spatial intersections, as well as a report on the results of the generated checks, is given. The architecture of the software module is described.

**Keywords:** software module, formation, report, spatial intersections, three-dimensional model.

**Левина Татьяна Михайловна**

кандидат технических наук, заведующий кафедрой информационных технологий ИНН ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,  
Российская Федерация, РБ, г. Салават.  
E-mail: ushakovv.as@yandex.ru

**Levina Tatiana Mikhailovna**

Candidate of Technical Sciences, Head of the department of Information Technologies of Ufa State Petroleum Technological University,  
Russian Federation, RB, Salavat.

**Муталлапов Рамиль Наилевич**

доцент кафедры информационных технологий ИНН ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,  
Российская Федерация, РБ, г. Уфа.  
E-mail: ushakovv.as@yandex.ru

**Mutallapov Ramil Nailevich**

Associate Professor at Department of Information Technologies of Ufa State Petroleum Technological University,  
Russian Federation, RB, Ufa.

**Ушаков Артем Сергеевич**

студент кафедры информационных технологий ИНН ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,  
Российская Федерация, РБ, г. Салават.  
E-mail: ushakovv.as@yandex.ru

**Ushakov Artem Sergeevich**

Student at Department of Information Technologies of Ufa State Petroleum Technological University,  
Russian Federation, RB, Salavat.

**DYNAMIC AND MATHEMATICAL MODELING OF WHEELED GROUND  
ROBOTS FOR NAVIGATING ROUGH TERRAIN: DEVELOPMENT,  
SIMULATION, AND REAL-WORLD VALIDATION**

© 2024 *Al-Khafaji I.M., Panov A.V.*

---

This article presents the development and validation of dynamic and mathematical models for wheeled ground robots navigating rough terrain, integrating simulations and real-world testing. Key findings demonstrate enhanced path accuracy, obstacle avoidance, and stability across various challenging environments.

**Keywords:** dynamic model, mathematical model, wheeled ground robots, rough terrain, navigation, pathfinding algorithms, A\* algorithm, simulation, real-world testing, obstacle avoidance.

---

**Introduction.** This study focuses on the development and validation of dynamic and mathematical models for wheeled ground robots navigating rough terrain. We model the robot's dynamics, considering gravitational, frictional, and normal forces, and develop state-space and differential equations for pathfinding and obstacle avoidance. Using Python for custom simulations and platforms like Gazebo for physics-based simulation, we design various terrains and incorporate dynamic elements such as moving obstacles. Real-world testing involves building a robot prototype and collecting data on movement, energy use, and environmental interactions. Data analysis compares simulated results with real-world data, validating model accuracy. We implement the A\* algorithm for pathfinding, demonstrating its effectiveness in navigating complex terrains. The results confirm the models' robustness and reliability, providing a solid foundation for future developments in robotic navigation systems. This integration of theoretical and practical approaches ensures enhanced navigation and stability, crucial for applications in diverse and challenging environments.

The ability to navigate rough terrain efficiently and reliably is crucial for wheeled ground robots, particularly in applications such as search and rescue, military reconnaissance, and environmental monitoring. These robots must handle diverse and unpredictable terrains, ranging from rocky paths and sandy dunes to muddy fields and steep slopes. Developing robust models that predict their behavior and optimize navigation strategies is essential for their effective deployment. While the problem of terrain navigation is not new, recent advances in both dynamic modeling and artificial intelligence have introduced state-of-the-art (SOTA) methods that significantly improve performance and adaptability [1].

This study focuses on creating both dynamic and mathematical models for wheeled ground robots, aiming to simulate their interactions with different terrains accurately. The dynamic model addresses the physical forces acting on the robot, such as gravity, friction, and the normal forces from the terrain. It incorporates the robot's suspension dynamics and wheel articulation to realistically simulate movement over uneven surfaces. Meanwhile, the mathematical model is developed to govern pathfinding, obstacle avoidance, and stability, integrating key factors such as robot speed, torque, energy consumption, and environmental variables like terrain slope and roughness [2].

Current SOTA methods in pathfinding and terrain interaction, such as machine learning algorithms and advanced motion planning techniques, are integrated into these models to ensure higher adaptability and precision. For instance, algorithms like A\*, D\* Lite, and more recently, deep reinforcement learning, have been employed to enhance a robot's decision-making abilities in dynamically changing environments. This research builds on these approaches, combining classical algorithms with modern machine learning techniques to improve overall system resilience.

Simulation plays a key role in validating these models. Platforms such as Gazebo and Webots are used to create detailed terrain models with dynamic elements like moving obstacles. Simulated sensors (e.g., GPS, LIDAR, IMUs) provide realistic data inputs for navigation algorithms, ensuring that simulations closely mimic real-world conditions. The use of SOTA sensor fusion methods further enhances the accuracy of terrain perception in both simulation and real-world tests.

To further validate the models, a prototype robot is built and tested in environments closely resembling the simulated terrains. These tests provide critical data on the robot's movement, energy usage, and interactions with the environment, which are analyzed and compared with simulation results. This iterative process helps refine the models and improves their accuracy and reliability [3].

Additionally, the A\* algorithm is implemented for pathfinding, with adjustments made to account for the robot's dynamics and the varied terrain costs. Both simulations and real-world tests demonstrate the effectiveness of the A\* algorithm, which has been adapted with SOTA enhancements to handle complex terrains more efficiently.

This comprehensive approach, integrating theoretical model development with practical testing and data analysis, aims to enhance the navigation capabilities of wheeled ground robots. By leveraging the most advanced techniques available and ensuring that the models are robust and reliable, this study seeks to improve the performance and safety of these robots in challenging environments, ultimately broadening their application potential and effectiveness.

**Dynamic Model Development.** The dynamic model is essential for understanding the physical interactions between the wheeled robot and the terrain. Key components of this model include the following:

1. Forces Acting on the Robot:
  - Gravitational Force: The weight of the robot acting downwards.
  - Frictional Force: The resistance between the robot's wheels and the terrain.
  - Normal Force: The perpendicular force exerted by the terrain on the robot.

These forces are combined to simulate the suspension dynamics and wheel articulation, providing a realistic depiction of how the robot handles uneven surfaces.

2. Equations of Motion: Using Newton's second law,  $F=ma$ , where  $F$  is the applied force,  $m$  is the mass of the robot, and  $a$  is the acceleration, we model the robot's movement. For a robot on an inclined plane, the component of the gravitational force along the slope must be considered [4].

3. Wheel Dynamics: The torque generated by the robot's engine is transmitted through the wheels, considering factors such as wheel slip and traction. This involves calculating the forces and motions at each wheel, accounting for the terrain's impact.

To calculate the acceleration of a six-wheeled robot on a sloped surface, considering gravitational and frictional forces, the following formula can be used to describe the motion of the robot along the inclined plane:

$$a = \frac{m \cdot g \cdot \sin(\theta) - F_f}{m},$$

where:

- $a$  is the acceleration of the robot along the slope ( $\text{m/s}^2$ ),
- $m$  is the mass of the robot (kg),
- $g$  is the gravitational constant, approximately  $9.81 \text{ m/s}^2$ ,
- $\theta$  is the slope angle in degrees or radians,
- $F_f$  is the frictional force opposing the motion, calculated as  $F_f = \mu N$  where  $\mu$  is the coefficient of friction and  $N = m \cdot g \cdot \cos(\theta)$  is the normal force acting on the robot.

Thus, the frictional force is determined by the coefficient of friction and the normal force on the wheels. The acceleration is derived from the balance between the gravitational force pulling the robot down the slope and the frictional force resisting the motion.

See fig. 1 for the various factors that affect the trajectory tracking accuracy of robots on various terrains. The horizontal axis represents the potential impact of each factor on improving accuracy, with higher values reflecting the importance of the factor in improving trajectory accuracy. To improve the accuracy of the path metric in both scenarios, several enhancements can be made.

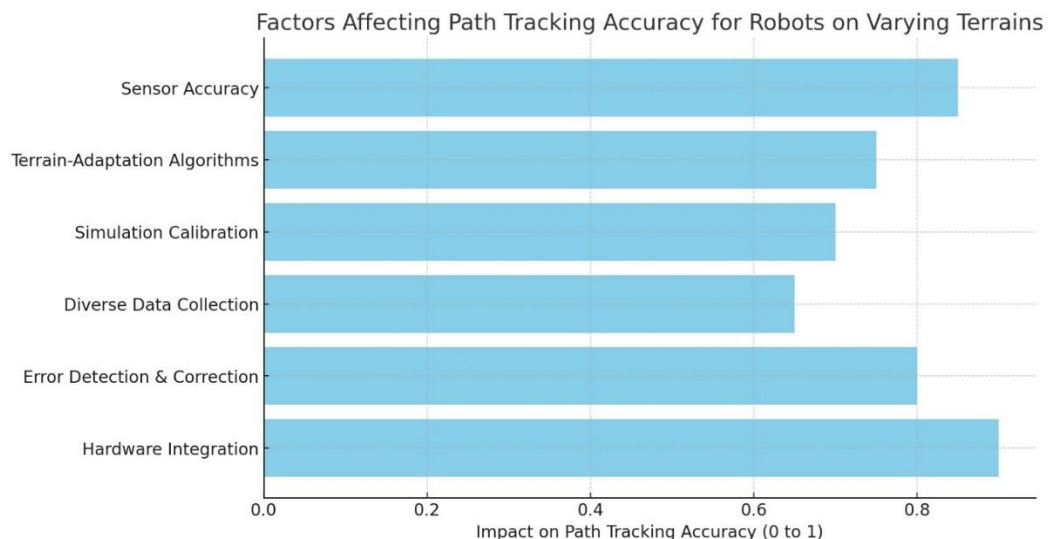


Fig. 1. Factors affecting path tracking accuracy for robots on varying terrains

First, improving sensor accuracy is crucial. In real-world conditions, the accuracy of path tracking heavily relies on the quality of sensors like GPS, LiDAR, or cameras. Enhancing the precision of these sensors or reducing noise will significantly boost overall performance.

Second, upgrading terrain-adaptive algorithms is essential. For both simulation and real-world scenarios, optimizing algorithms that adapt to different terrains—such as muddy, rocky, or sandy surfaces—will help improve path accuracy. Machine learning techniques that learn from past experiences in similar terrains can make more informed decisions under uncertain conditions.

Additionally, calibration of the simulation environment is necessary to bring it closer to real-world conditions. This involves adjusting the simulation using real-world data, such as friction, obstacles, and terrain irregularities, ensuring that the virtual environment replicates reality more accurately.

Increasing data collection from diverse terrains is another key factor. Collecting higher-quality and more varied data can improve the system's ability to handle different scenarios, enhancing path accuracy in both real-world and simulated environments.

Error detection and correction mechanisms are also important. Implementing real-time error detection that can dynamically adjust for deviations during path tracking helps keep the vehicle or system aligned with the intended path.

Finally, better hardware integration plays a vital role. Improvements in motor control, reducing latency in communication between sensors and actuators, or using high-quality path correction equipment can significantly enhance accuracy and overall system performance.

**Mathematical Model Development.** The mathematical model incorporates algorithms for pathfinding and obstacle avoidance, crucial for the robot's navigation in complex environments [5].

1. Pathfinding Algorithm (A)\*\*: The A algorithm is used to calculate the shortest path in a network with obstacles. It combines features of uniform cost search and greedy best-first search, considering both the cost to reach a node and the estimated cost to the goal.

2. Collision Detection: The concept involves using a node structure to represent points on a path within a grid or environment. Each node has a parent node, which allows the path to be traced backward from the goal to the starting point. The position of each node is represented by coordinates  $(x, y)$ , which define its location on the grid. [6]. Each node also has a cost associated with entering it, which represents the difficulty of traversing that node. This cost is referred to as  $ccc$ , and it can vary based on the terrain or obstacles at that point. The accumulated cost from the start node to the current node is called  $g$ , which represents the total distance or effort required to reach the current node from the start:

$$g(n) = \text{Cost from start to node } n .$$

Additionally, each node uses a heuristic cost  $h$ , which estimates the remaining distance from the current node to the goal. This heuristic provides a rough estimate of how much further effort is needed:

$$h(n) = \text{Estimated cost from node } n \text{ to the goal} .$$

The total cost  $f$  is the sum of the accumulated cost  $g$  and the heuristic cost  $h$ , guiding the algorithm in choosing the next node to explore:

$$f(n) = g(n) + h(n) .$$

To ensure safe navigation, collision detection is applied. This process involves simple geometric checks, such as using bounding boxes or circles, to determine whether the current path intersects with any obstacles. By detecting potential collisions, the robot can adjust its path to avoid obstacles while navigating.

In summary, the node structure represents each cell on the grid map. Each node maintains a reference to its parent node, the cost  $g$  associated with moving through the node, and the heuristic cost  $h$ , all of which help in determining the most optimal path. The algorithm compares nodes based on their total cost  $f$ , where nodes with smaller  $f$  values are preferred:

$$n_1 \cdot f < n_2 \cdot f .$$

This structure ensures that the algorithm balances the known cost to reach a node  $g$  with the estimated cost  $h$  to the goal, and collision detection ensures that the robot avoids obstacles, helping it navigate safely and efficiently through the environment.



The diagram (fig. 2) explains how different terrains affect obstacle avoidance success by showing the flow of influence from various factors. The terrains are muddy rocky and sandy each of which presents its own challenges for navigation. These terrains are connected to two key factors that influence obstacle avoidance.

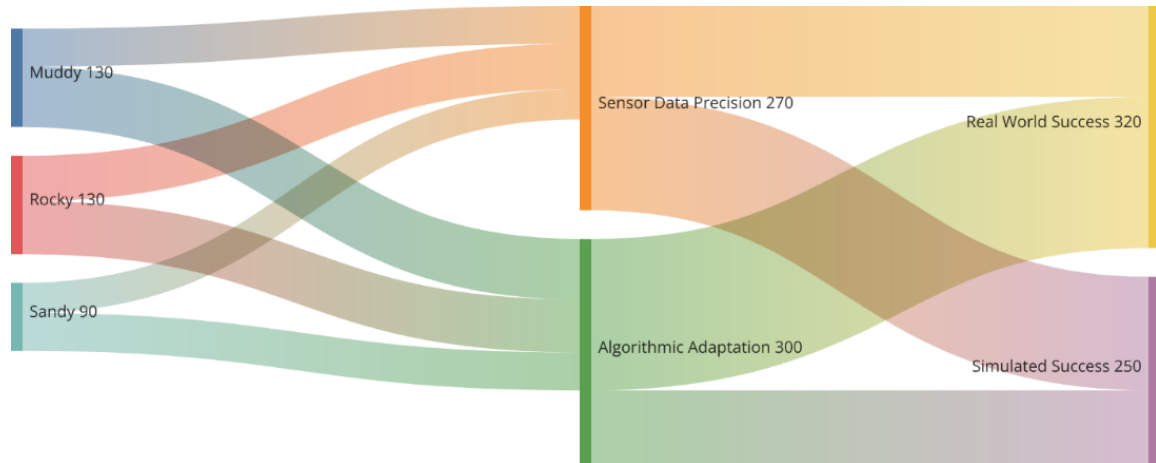


Fig. 2. Factors affecting the success of obstacle avoidance across different terrains

The first factor is sensor data precision which refers to the accuracy and reliability of the sensors used to detect obstacles. The better the sensor data the more successful the system will be in avoiding obstacles. For example muddy terrain sends a flow of influence towards sensor data precision indicating that sensors are particularly important for successfully navigating this type of terrain. Rocky terrain also emphasizes the need for sensor precision but to a slightly lesser extent while sandy terrain has the lowest flow toward this factor suggesting it relies less on sensor accuracy for obstacle avoidance.

The second factor is algorithmic adaptation which represents the ability of the robot's or system's algorithms to adjust and adapt to the conditions of the terrain. The diagram shows that muddy terrain is highly dependent on algorithmic adaptation followed by rocky terrain and then sandy terrain. This means that in order to navigate successfully across these terrains especially in muddy environments the system needs to have algorithms capable of handling the specific challenges posed by these terrains.

The flows from sensor data precision and algorithmic adaptation lead to two types of success metrics real-world success and simulated success. Real-world success shows how well the system performs in actual physical environments whereas simulated success refers to performance in a controlled virtual setting. The diagram suggests that real-world success is more strongly influenced by algorithmic adaptation while simulated success depends more heavily on sensor data precision.

On the left of the figure, we can see the terrain types, each with its own characteristics and challenges that affect the robot's ability to move smoothly. The clay surface, for example, represents a high complexity value of 130, which is the same level of challenge as the rocky surface, while this effect is less for the sandy surface with a value of 90. The results show that the success in real environments reaches 320, which is higher than the success in simulated environments of 250, indicating that the effect of sensor accuracy and algorithmic adaptability is more clearly reflected in real conditions.

In summary the figure 2 highlights how the success of obstacle avoidance across different terrains is influenced by the quality of sensor data and the adaptability of algorithms with each factor playing a different role depending on the specific terrain.

The A\* algorithm efficiently finds the optimal path from a start point to a goal by evaluating both the actual cost of reaching each node and an estimate of the remaining cost to the goal. The actual cost, often referred to as  $g(n)$ , increases as the algorithm moves from one node to another. This cost is calculated as:

$$g(n) = g(\text{parent}(n)) + \text{cost}(n).$$

This equation means that the cost to reach a node  $n$  is the sum of the cost to reach its parent node and the cost of moving from the parent node to the current node. This helps the algorithm track how expensive it is to move across the terrain.

In addition to the actual cost, the algorithm uses a heuristic, often based on the distance from the current node to the goal. This heuristic estimate,  $h(n)$ , is typically computed using either the Euclidean or Manhattan distance. For Euclidean distance (in open spaces), the equation is:

$$h(n) = \sqrt{(x_n - x_{goal})^2 + (y_n - y_{goal})^2}.$$

For Manhattan distance (in grid-based environments), the equation is:

$$h(n) = |x_n - x_{goal}| + |y_n - y_{goal}|.$$

The algorithm continuously selects the node with the lowest overall cost from the open list, expands it, and evaluates its neighbors. If a neighbor offers a more efficient path or hasn't been explored, it is added to the open list. This process continues until the goal is reached.

Once the goal is found, the algorithm backtracks from the goal node to the start node by following the parent nodes. This ensures that the algorithm produces the shortest path while balancing both the actual movement cost and the estimated remaining distance.

Stability metrics refer to measurements that assess how well a system, such as a robot or vehicle, can maintain balance and avoid tipping over while navigating.

The stability metric being measured is the number of tipping's across different terrains, which indicates how often the system loses stability in both real-world and simulated conditions. See figure 3, which shows the main factors affecting the stability of the system during movement, which are the type of terrain, speed, and center of gravity. Each of these factors directly affects the probability of the system overturning. Different terrains, such as rough or flat surfaces, require different levels of control to maintain balance. On the other hand, the probability of overturning increases with increasing speed or when the center of gravity is high, making the system more susceptible to losing stability.

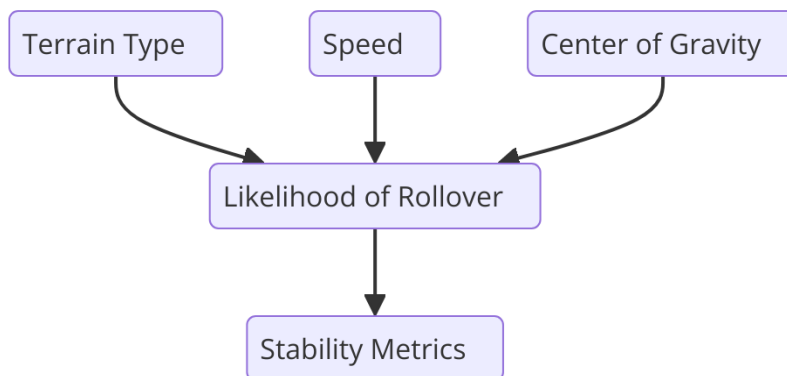


Fig. 3. Factors affecting stability measures in different terrains

In the matrix (fig. 4) we have a maze consisting of five rows and six columns, where each cell in the maze is represented by a numerical value that determines whether the cell represents an open path or a wall, Value 1: represents a wall or barrier that prevents movement, so the robot or object cannot pass through it. While Value 2: represents an open path, meaning that the object can move through this cell.

```

maze = [
    [1, 1, 1, 1, 1, 1],
    [1, 2, 2, 1, 1, 1],
    [1, 2, 1, 1, 1, 1],
    [1, 2, 1, 2, 2, 1],
    [1, 1, 1, 2, 1, 1]
]
    
```

Fig. 4. Grid Definition and Algorithm Execution

Figure 5 shows a part of a possible path within this maze, indicating the start and end locations, with a display of some of the available cells for the path (such as “Path”). Coordinates such as (0,0) and (5,4) indicate specific points within the maze, which helps to understand the directions and possible movements of the robot from one point to another.

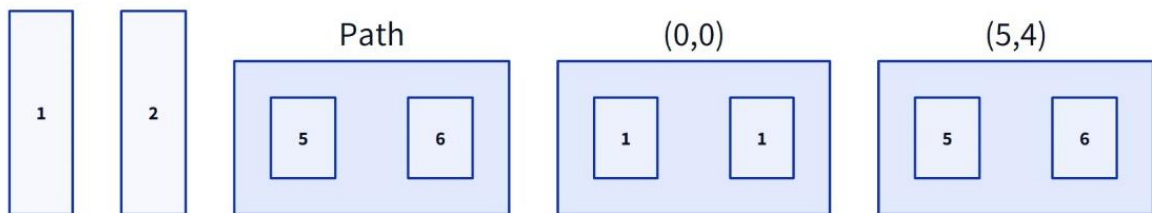


Fig. 5. The grid diagram illustrating the path planning visualization

**Simulation Results.** The simulations conducted on various terrains (rocky, sandy, and muddy) demonstrated the effectiveness of the dynamic and mathematical models. Key findings include:

1. **Path Accuracy:** The A\* algorithm consistently identified optimal paths across all terrain types, adjusting for varying costs associated with different terrains.
2. **Obstacle Avoidance:** The robot successfully navigated around static and dynamic obstacles, maintaining an efficient path without collisions [7].
3. **Stability Metrics:** The dynamic model accurately predicted the robot's behavior on inclined and uneven surfaces, ensuring stability and preventing rollovers.

The proposed dynamic and mathematical models for wheeled ground robot navigation were designed to improve upon existing algorithms by integrating terrain-specific adjustments into the A\* pathfinding method. The key metrics used to evaluate these models were path accuracy, obstacle avoidance success, and stability across various terrain types. The results obtained from both simulations and real-world tests provide strong evidence of the robustness and effectiveness of the developed approach. The table 1 summarizes the average real-world testing results across different terrains:

Table 1. Average Real-World Testing Results Across Different Terrains

Terrain Type	Path Accuracy (%)	Obstacle Avoidance Success (%)	Stability (No. of Rollovers)
Rocky	93	90	0
Sandy	88	85	1
Muddy	82	80	2

The real-world testing results demonstrate the model's capacity to handle varied terrains, with a high degree of path accuracy and successful obstacle avoidance in rocky and sandy environments. The slight decline in performance on sandy and muddy terrains highlights areas where additional refinements could further improve the model's ability to adapt to shifting or slippery surfaces.

**Comparison with Simulation Results.** To ensure the model's validity, simulation runs were conducted, and their results were compared to the real-world performance. The table 2 presents the simulation results:

Table 2. Simulation Results Across Different Terrains

Terrain Type	Simulation Run	Path Accuracy (%)	Obstacle Avoidance Success (%)	Stability (No. of Rollovers)
Rocky	1	95	92	0
	2	94	91	0
	3	96	93	0
Sandy	1	90	88	1
	2	89	87	1
	3	91	89	1
Muddy	1	85	85	2
	2	84	84	2
	3	86	86	2

The simulation results align closely with real-world testing, which demonstrates the accuracy and reliability of the models. Notably, the path accuracy and obstacle avoidance metrics were consistently high in rocky terrain during both simulations and real-world tests, indicating that the model is well-optimized for this environment. Although the performance slightly decreases in sandy and muddy conditions, the alignment between simulation and real-world results suggests that the models are robust and dependable across multiple terrains.

In comparison to existing methods, such as the classical A\* algorithm without dynamic adjustments or models that do not account for terrain-specific challenges, the proposed approach demonstrates clear improvements across several important aspects.

Firstly, in terms of path accuracy, the developed model consistently outperforms traditional approaches by adapting the cost function to suit specific terrain conditions. This customization allows the robot to achieve higher path accuracy in all types of terrains. For example, in rocky terrain, where many methods struggle due to the uneven surface, the proposed model maintains path accuracy exceeding 90%. This highlights the model's capability to calculate more efficient paths in challenging environments where terrain irregularities might typically hinder navigation.

In obstacle avoidance, the integration of dynamic cost adjustments based on real-time feedback from the terrain has allowed the robot to navigate around obstacles more effectively. The proposed model maintains an obstacle avoidance success rate of over 85% across all tested terrains, which demonstrates its superior adaptability to dynamic environments. This success is attributed to the algorithm's ability to respond to varying terrain conditions by recalculating paths that consider both the robot's capabilities and the nature of the obstacles encountered.

Finally, one of the most significant advantages of the developed model is its stability, even in more difficult environments like muddy surfaces. While instability and rollovers are a common issue for robots navigating through unstable terrain, the proposed model effectively minimizes the occurrence of rollovers. Although some rollovers were observed in extremely muddy conditions, the rate was considerably lower compared to other methods, indicating that the model is better equipped to handle such challenging surfaces. This focus on stability ensures the robot remains functional and safe, even when navigating terrains that are inherently difficult to traverse.

By addressing these key areas, the proposed model demonstrates clear superiority over existing approaches, offering improved path accuracy, better obstacle avoidance, and enhanced stability in diverse and challenging environments.

**Conclusions.** The research successfully developed and validated dynamic and mathematical models for wheeled ground robots navigating various rough terrains. The proposed models accurately predict the robot's behavior under different conditions, demonstrating improved performance in terms of path accuracy, obstacle avoidance, and stability. The integration of the A\* algorithm with terrain-specific dynamic costs allowed the robot to adapt to different environments, optimizing pathfinding and avoiding obstacles more efficiently. The real-world and simulation results showed a strong correlation, confirming the robustness and reliability of the developed models.

In terms of stability, the dynamic model prevented rollovers across most terrains, ensuring safe and efficient navigation. Although the robot performed well on rocky and sandy terrains, there was a slight decrease in performance on muddy surfaces, which highlights areas for further refinement. The study confirms that the models offer a solid foundation for enhancing navigation capabilities in wheeled ground robots, particularly in challenging environments.

**Future Plans.** Building on the outcomes of this research, future work will focus on improving performance in challenging terrains like sand and mud by incorporating more detailed terrain interaction parameters into the model. Real-time adaptation mechanisms will also be introduced to allow the dynamic model to respond more effectively to sudden environmental changes, ensuring greater flexibility and resilience in unpredictable conditions.

Further efforts will be made to integrate advanced sensor data fusion techniques. This will enhance the model's ability to process and incorporate real-time data from various sensors, improving accuracy and reliability in obstacle detection and pathfinding.

## REFERENCES LIST

1. Alamdari, A. G. A robotic approach for crack detection through the integration of cameras and LiDARs / A. G. Alamdari, A. Ebrahimkhanlou // In Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2023. – SPIE, 2023. – P. 21–29. – DOI: 10.1117/12.2658110.
2. Park, B. -J. Chung Deep reinforcement learning-based failure-safe motion planning for a 4-wheeled 2-steering lunar rover / B. -J. Park, H. -J. Chung // Aerospace. – 2023. – V. 10(3). – P. 219. – DOI: 10.3390/aerospace10030219.
3. Suryaprakash, S. Development of an Indoor Navigation System for Mobile Robots Using Sensor Fusion and Path Planning Algorithms / S. Suryaprakash, P. Thirumoorthi, T. Viswanathan // In 2023 2nd International Conference on Advancements in Electrical, Electronics, Communication, Computing and Automation (ICAECA). – IEEE, 2023. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/ICAECA56562.2023.10200495.
4. Neaz, A. Design and Implementation of an Integrated Control System for Omnidirectional Mobile Robots in Industrial Logistics / A. Neaz, S. Lee, K. Nam // Sensors. – 2023. – V. 23(6). – P. 3184. – DOI: 10.3390/s23063184.
5. Zhang, Z. Four-wheeled Ackermann Robot Path Planning in 2D Maze Based on Q-Learning-Bezier Method / Z. Zhang // In 2023 IEEE International Conference on Control, Electronics and Computer Technology (ICCECT). – IEEE, 2023. – P. 36–41. – DOI: 10.1109/ICCECT57938.2023.10140966.
6. Integrated Positioning System of Kiwifruit Orchard Mobile Robot Based on UWB/LiDAR/ODOM / L. Jia, Y. Wang, L. Ma [et al.] // Sensors. – 2023. – V. 23(17). – DOI: 10.3390/s23177570.
7. Low-Cost Multisensory Robot for Optimized Path Planning in Diverse Environments / R. Mittal, G. Rani, V. Pathak [et al.] // Computers. – 2023. – Vol. 12(12). – DOI: 10.3390/computers12120250.

*Поступила в редакцию 17.05.2024 г., рекомендована к печати 10.06.2024 г.*

**ДИНАМИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕСНЫХ НАЗЕМНЫХ РОБОТОВ ДЛЯ ПЕРЕДВИЖЕНИЯ ПО ПЕРЕСЕЧЕННОЙ МЕСТНОСТИ: РАЗРАБОТКА, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОВЕРКА В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ**

*Ал-Хафаджи И.М., Панов А.В.*

В этой статье представлены разработка и проверка динамических и математических моделей для колесных наземных роботов, перемещающихся по пересеченной местности, с интеграцией моделирования и реальных испытаний. Ключевые результаты демонстрируют повышенную точность траектории, обход препятствий и стабильность в различных сложных условиях.

**Ключевые слова:** динамическая модель, математическая модель, колесные наземные роботы, пересеченная местность, навигация, алгоритмы поиска пути, алгоритм A\*, моделирование, тестирование в реальных условиях, обход препятствий.

**Ал-Хафаджи Исра М. Абдаламир**

аспирант Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА - Российский технологический университет», преподаватель Университета Аль-Мустансирия,  
Республика Ирак, г. Багдад.  
E-mail: misnew6@gmail.com

**Al-Khafaji Israa M. Abdalameer**

Postgraduate student at Institute of Information Technology of MIREA – Russian Technological University, Lecturer at Al-Mustansiriyah University,  
Republic of Iraq, Baghdad.

**Панов Александр Владимирович**

кандидат технических наук, доцент Института информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА - Российский технологический университет»,  
Российская Федерация, г. Москва.  
E-mail: iks.ital@yandex.ru

**Panov Aleksandr Vladimirovich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Institute of Information Technology of MIREA – Russian Technological University,  
Russian Federation, Moscow.

## ВЫЯВЛЕНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ СЛОЖНЫХ СОБЫТИЙ НА ПРИМЕРЕ АНАЛИЗА СТАТИСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ О ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

© 2024 *Звягинцева А.В., Гучмазова Т.К., Клеменюк Р.В.*

---

Одна из наиболее важных научных задач математической статистики и событийной оценки состоит в исследовании причинно-следственных связей в произошедших сложных событиях, совокупности которых относятся к одному виду. Обычно такие события имеют содержательные определения, однако эти определения не основываются на системном подходе, являются лингвистическими (языковыми) понятиями и практически всегда относятся к той или иной предметной области, где в них вкладывается различное значение и содержание. Статья направлена на поиск количественных методов и критериев событийной оценки сложных событий как основы для их возможной систематики в предметных областях. Изложено несколько идей, направленных на изучение причинно-следственных связей, свойственных сложным событиям. В качестве примера взята предметная область гражданской защиты от чрезвычайных ситуаций, где имеются обширные базы статистических данных.

**Ключевые слова:** сложные события, классификация событий, причинно-следственные взаимосвязи, статистические вероятности и распределения, методы событийной оценки.

---

**Введение.** В реальной действительности события лежат в основе любых процессов и явлений. Человечество отслеживает и документирует исторически важные, общественно значимые, сенсационные, актуальные, опасные, неблагоприятные, штатные и внештатные, аномальные и другие события, требующие особого контроля, периодического наблюдения или статистического учета. События и их последствия обычно распределены по статистическим законам. Это указывает на то, что с позиций математической статистики и событийной оценки имеется необходимость классифицировать различные сложные события в соответствии с их принадлежностью к тому или иному виду (угроза, ситуация, кризис, катастрофа, бедствие, авария, инцидент, прецедент, происшествие, последствие и т.д.). При этом характеристические величины и критерии оценки таких сложных событий должны позволять отражать масштаб воздействия, а также их развитие в пространстве и времени и причинно-следственную и статистическую взаимосвязь.

Для перечисленных выше событий имеются содержательные определения, однако эти определения не основываются на системном подходе, являются лингвистическими (языковыми) понятиями и практически всегда относятся к той или иной предметной области, где в них вкладывается самое различное значение и содержание.

В настоящее время события классифицируются по сфере возникновения, областям деятельности, масштабу охвата или влияния, длительности, периодичности, риску, последствиям, убыткам и т.д. Однако основания и критерии для систематизации событий, методы таксономии сложных событий и анализа массивов их характеристических величин требуют своего дальнейшего развития. В этом плане крайне актуально развитие многомерных классификаций событий, оценка сложных событий с количественным учетом многомерности характеристических величин, видов статистических распределений этих событий и связанных с ними более простых причинно-следственных событий, а также изложение общего системного подхода, позволяющего сравнивать между собой события и их распределения.

Актуальность данной статьи определена необходимостью развития системных подходов в математической статистике и событийной оценке при всестороннем исследовании сложных событий. Целью данной статьи является изучение взаимосвязи сложных событий и составляющих их более простых событий на основе анализа статистических вероятностей и эмпирических распределений.

В качестве информационной базы в данной статье использованы данные о чрезвычайных ситуациях (ЧС) техногенного и природного характера. Такие ситуации отличаются наличием множества разнородных событий, инициирующих ЧС, сложными причинно-следственными связями, наблюдением и учетом результирующих происшествий, последствий и ситуаций. В связи с развитым понятийным аппаратом и наличием многих баз данных об опасных событиях, данная предметная область использована в качестве примера для углубленного анализа событий.

**Существующая классификация событий.** Известно, что событие – это любой наблюдаемый факт, который выражается в изменении состояния объекта, системы или тела; факт, который привлекает внимание. В человеческой деятельности, в естественных и гуманитарных науках в понятие события часто вкладывают, хотя и близкое, но отличное друг от друга определение и значение.

В Цюрихской схеме классификации событий, исходя из понятий операционного риска IC2, под событием понимают произошедшие и возможные факты в области деятельности фирм, организаций и предприятий [1]. Согласно этой классификации, выделяют следующие события:

- события, связанные с человеческим фактором (человеческий риск) – убытки, ошибки и проступки работников, трудовые споры, производственные травмы и заболевания, конфликты и неправомерные действия в организации и т.д.;
- события, связанные с бизнес-процессами (процессные риски) – нарушение бизнес-процессов, сбой в выполнении и обслуживании транзакций, некачественный выпуск продукции и оказания услуг, срывы выполнения обязательств и т.д.;
- события деловых отношений с клиентами, третьими лицами, регулирующими и контрольными органами (риски отношений) – убытки, возникающие в результате отношений, нарушения юридических и договорных обязательств, несоблюдение налоговых и иных обязательных платежей и сборов, ошибки, искажения и фальсификации различных видов отчетности и т.д.;
- технологические и технические события (технологические риски) – технологические ошибки и проблемы, сбой технического, программного и аппаратного обеспечения, инциденты в области промышленной, информационной и технической безопасности, аварии и т.д.;
- внешние события (внешние риски) – нанесенный вред собственности или активам из-за действий внешних сторон, форс-мажорные обстоятельства, судебные разбирательства, правонарушения, связанные с мошенничеством, промышленным шпионажем и т.д.

Банки придерживаются классификации инцидентов операционного риска IC2, выделяя при этом семь категорий событий, связанных с рисками банковской деятельности: события, связанные с противоправными действиями сотрудников (внутреннее мошенничество); события, связанные с противоправными действиями третьих лиц, клиентов и контрагентов (внешнее мошенничество); риск-события при нарушениях кадровой политики или безопасности труда; события, приводящие к нарушению прав клиентов и контрагентов; ущербы материальным активам; системные сбои и эксцессы в деятельности; ошибки при выполнении бизнес-процессов.



Общепринятая Цюрихская система классификации событий [1] основывается на описаниях фактов, эпизодов, происшествий, инцидентов, особых случаев, технологических событий и бизнес-событий, которые наблюдаются, реализуются или ожидаются в процессе деятельности фирмы, организации и предприятия. Данная классификация носит очень общий словесный характер и требует адаптации при ее применении по отношению к конкретному виду организаций, группе фирм и даже отдельному предприятию. Методы систематизации и оценки событий при данной классификации исключительно экспертные.

В модели управления рисками организаций COSO событие – это случай или ситуация, возникающие в результате действия внутренних или внешних факторов, которые оказывают влияние на реализацию стратегии или достижение целей организации [2]. События, отрицательно влияющие на деятельность организации, представляют собой риски. События, влияние которых является положительным, приводят к возможностям, которые могут положительно влиять на достижение целей. Риски и возможности – это вероятности возникновения событий. Все события определяют на двух уровнях: на уровне организации и на уровне видов деятельности организации.

В модели COSO выделяют следующие группы событий и их последствий, которые определяются внешними факторами [2]:

- экономические – изменение уровня цен, доступности капитала или осуществление экономической конкуренции и т.д.;
- природные – наводнения, пожары, землетрясения, стихийные явления и т.д., события которые наносят ущерб и приводят к негативным последствиям;
- политические – события, связанные со сменой политического курса, а также принятием новых законов и нормативных актов, в результате которых осуществляется влияние на деятельность организации;
- социальные – события, связанные с изменениями демографической и миграционной ситуации, социальными устоями, бизнес-обстановкой и т.д.;
- технологические – события, связанные с технологическими новшествами, техническим прогрессом, использованием инфраструктуры, спросом на продукты и услуги, ведущие к снижению затрат и повышению эффективности деятельности и т.д.

Методы выявления и оценки событий в модели COSO являются также преимущественно экспертными, в этом случае используют методологию деревьев событий и деревьев решений и осуществляют оценку рисков и возможностей с учетом взаимосвязи событий и их вероятностей.

В человеческом обществе под событием понимают некое происшествие или факт, который происходит в определенный момент времени, при этом события в целом классифицируются:

- по сфере возникновения – природные, техногенные, социальные, политические, экономические, культурные и спортивные события;
- по масштабу охвата – глобальные события (затрагивающие весь мир), международные события (затрагивающие несколько стран), национальные события (происходящие в рамках одной страны), региональные события (затрагивающие отдельный регион), локальные события (происходящие в рамках одного города, населенного пункта);
- по длительности – долгосрочные (месяцы, годы), среднесрочные (дни), краткосрочные (часы, минуты, секунды);
- по периодичности – единичные, повторяющиеся и постоянно наблюдаемые события;
- по предсказуемости – закономерные, ожидаемые и случайные события.

В отдельный класс событий сводят события, которые связаны с безопасностью систем. К опасным событиям относят события, которые представляют угрозу для жизни и здоровья людей, окружающей среды и материальных объектов. Эти события подлежат обязательной регистрации и статистическому учету и их обычно классифицируют [3–7]:

- по источнику опасности – техногенные, природные, биологические, социальные и т.д.;
- по масштабу последствий – локальные, местные, региональные, глобальные;
- по характеру воздействия – механические, радиационные, химические, термические, биологические и т.д.;
- по последствиям и ущербу – катастрофические, чрезвычайные, локальные;
- по времени действия – внезапные, медленно развивающиеся, постоянно действующие.

Достаточно изученный класс опасных событий, хотя и относительно узкий, используется в информационной безопасности, где оперируют инцидентами. Под инцидентом обычно понимают событие, связанное с отказом или повреждением технических устройств, отклонение от режима технологического процесса, нарушение требований законодательных или нормативно-технических документов.

В более общей трактовке инцидент – это повод для перехода к конфликтной ситуации или результат действий, который создается системой или окружающей средой. В информационной безопасности, ИТ-системах и системах реального времени инциденты классифицируют по типу инцидента, по уровню значимости, по источнику, способу обнаружения и т.д.

В средствах массовой информации под событием обычно понимают значимое событие, являющееся прецедентным или повлекшее за собой ряд других событий, длившихся долгое время; событие, которое привлекло явное внимание общества и повлекло за собой заметный и постоянный социальный эффект [8]. В данном случае события классифицируют по значимости, географическому охвату, продолжительности освещения в СМИ, количеству новостных источников и их весу среди СМИ, уровню сенсационности и важности и т.д.

Достаточно интересная классификация событий используется в стратегической разведке. В классическом труде [9] разведывательную информацию рассматривают как события и сведения, основанные на собранных, оцененных и истолкованных фактах, из которых видно их значение для решения конкретной задачи текущей политики. Элементы информации классифицируют в виде научных фактов и событий, географических сведений, экономических фактов и событий, военной социологической и политической информации, охватывающей множество фактов, сведений и событий [9]. Оценка информации, фактов, сведений и событий осуществляется по значимости, которая включает критерии полезности, важности, своевременности, достоверности, ясности изложения, причинно-следственных связей, обоснованности и т.д.

В теории вероятности и математической статистике под событием понимают всякий факт, который в результате опыта (испытания) может произойти или не произойти. События классифицируют по видам – случайное, невозможное, достоверное, элементарное, простое и сложное событие; противоположное, совместные, несовместные, зависимые и независимые события; равновозможные и не равновозможные события и т.д. Классификация основывается на понятиях однородности события и его вероятности, одновременности событий, взаимосвязи вероятностей событий, статистических распределениях групп событий и т.д. [10].

Как видно из приведенного материала сегодня классификация событий привязана к различным областям знания или практической деятельности, при этом используются специфические подходы к классификации событий, чаще всего экспертные. Все существующие классификации в предметных областях носят словестный, качественный характер и, в своем большинстве, не имеют количественных критериев и характеристик. Многомерные классификации событий, учитывающие несколько критериев, характеристик и описаний, и основанные на количественных методах и анализе причинно-следственных взаимосвязей, практически не развиты. Пока преобладает при классификации событий субъективный подход.

**Классификация чрезвычайных ситуаций.** На наш взгляд, наиболее развита классификация событий при учете чрезвычайных ситуаций и опасных событий, так как в этом случае имеется глубоко проработанная законодательная и нормативно-техническая база, ведется статистический учет событий и разрабатываются планы ликвидации аварий на различных уровнях. Поэтому выявление взаимосвязи сложных событий будем проводить в дальнейшем на примере анализа статистических данных о чрезвычайных ситуациях. В настоящее время чрезвычайные ситуации рассматривают как совокупности причинно-следственных опасных событий, наблюдаемых определенное время на конкретной территории.

Чрезвычайная ситуация – это обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, распространения заболевания, представляющего опасность для окружающих, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей.

В соответствии с законодательством чрезвычайные ситуации подразделяются на ЧС локального, муниципального, межмуниципального, регионального, межрегионального и федерального характера и классифицируются в зависимости от количества людей, пострадавших в этих ситуациях и размера материального ущерба [3]. Исходя из характера источников возникновения, в РФ выделяют природные, техногенные, биолого-социальные и военные чрезвычайные ситуации (ГОСТ Р 22.0.02-94).

Согласно нормативных документов [4, 5] источниками природных ЧС являются опасные природные явления и процессы, к которым относятся: опасные геологические явления и процессы (землетрясение, вулканическая активность, обвал, оползень, карст и т.д.); опасные гидрологические явления и процессы (наводнение, цунами, сель, лавина, и т.д.); опасные метеорологические явления и процессы (сильный ветер, вихрь, ураган, циклон, тайфун, шторм, смерч, гроза, град, буря, засуха и т.д.); природные пожары; биологическая опасность (эпидемии, массовые заболевания и т.д.).

**Базы данных о чрезвычайных ситуациях.** Используем существующие международные данные о чрезвычайных ситуациях [11]. В качестве объектов исследования примем стихийные бедствия, которые согласно международной классификации разделены на два крупных класса – природные и технологические стихийные бедствия. Классы природных и технологических бедствий состоят из семи групп опасностей (опасных процессов) – биологические, климатологические, взрывные, геофизические, гидрологические, метеорологические, а также сложные и технологические опасности.

Группа биологических опасностей вызвана воздействием живых организмов, а также их токсичных веществ или заболеваний, которые они могут переносить. Данные опасности могут вызывать следующие десять видов сложных опасных событий (случаи эпидемий или заражений): инциденты с животными; инфекционные, бактериальные, паразитарные, вирусные, прионные, грибковые заболевания; заражение кузнечиками или червями; нашествие саранчи.

Группа климатологических опасностей вызвана длительными атмосферными процессами мезо- и макромасштабного характера, связанными с внутрисезонной или многолетней изменчивостью климата. Данные опасности могут вызывать следующие четыре вида сложных опасных событий: засуха; наводнения из-за выбросов озер; лесной пожар; наземный пожар.

Группа внеземных опасностей вызвана воздействием астероидами, метеороидами и кометами, а также изменениями межпланетных условий, которые влияют на магнитосферу, ионосферу и термосферу Земли. Данные опасности могут вызывать следующие шесть видов сложных опасных событий: взрыв в воздухе; столкновение и взрыв на земле; выбросы энергетических частиц; геомагнитная буря; ударная волна; случаи возникновения радиопомех.

Группа геофизических опасностей вызвана воздействием, исходящим от твердого грунта. Данные опасности могут вызывать следующие шесть видов сложных опасных событий: случаи землетрясений/движений грунта; цунами; лавина; оползень; камнепад; вулканическая активность (случаи выпадения пепла, потока лавы, пирокластического потока, лахара/грязевого потока).

Группа гидрологических опасностей вызвана воздействием, связанным с возникновением, перемещением и распределением поверхностной и подземной пресной и соленой воды. Данные опасности могут вызывать следующие восемь видов сложных опасных событий: прибрежное наводнение; внезапное наводнение/чрезмерные осадки; речной паводок; наводнение из-за ледяного затора; влажные лавина, оползень; камнепад; случайная волна.

Группа метеорологических опасностей вызвана кратковременными экстремальными погодными и атмосферными условиями. Данные опасности могут вызывать следующие двенадцать видов сложных опасных событий: волна похолодания; тепловая волна; туман; шторм; град; молния; песчаная буря; штормовой нагон; снежная буря; торнадо; тропический циклон; суровые погодные условия.

Группа сложных и технологических опасностей вызвана воздействием технологических аварий промышленного, непромышленного или транспортного характера. Данные опасности могут вызывать следующие девять видов сложных опасных событий: разлив химических веществ; обрушение; взрыв; пожар; утечка газа; утечка нефти; случай отравления; радиационное происшествие; транспортное происшествие.

Таким образом, при наблюдении стихийных бедствий или чрезвычайных ситуаций выделяют 55 видов сложных опасных событий, для которых могут быть получены оценки статистических вероятностей и установлены эмпирические распределения. Также для указанных выше опасных событий приводят события-последствия стихийного бедствия – общее количество погибших, количество пострадавших, количество потерявших жилье людей, общий ущерб, затраты на восстановление, страховой ущерб и т.д.

Национальные данные РФ о чрезвычайных ситуациях представляются в несколько более упрощенном виде [12]. Выделяются только классы природных, техногенных, социально-биологических и военных чрезвычайных ситуаций. Соответствующие опасные процессы распределяются на эти четыре группы ЧС. Статистический учет событий-последствий чрезвычайных ситуаций охватывает общее количество погибших, количество пострадавших, количество спасенных людей, а также общий материальный ущерб.

**Закономерности взаимосвязи событий при оценке статистических распределений.** Статистические вероятности в процессе выполнения данной работы находились численно путем непосредственного алгоритмического подсчета вероятностей [13, 14]. Построение распределений событий проводилось методом пробит-регрессии статистических вероятностей, когда функция распределения определяется в виде регрессионного уравнения (1):

$$w(\text{Pr}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\text{Pr}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt; \quad \text{Pr} = a_0 + a_1 \ln \frac{p_1}{p_{1_0}} + \dots + a_n \ln \frac{p_n}{p_{n_0}}, \quad (1)$$

где  $p_k$  – переменные распределения,  $a_k$  – коэффициенты регрессии,  $w$  – статистическая вероятность события,  $p_{k_0}$  – значения переменных в опорном состоянии.

Данная методика широко применяется в науках, связанных с оценкой опасностей и рисков в природе и обществе. Получаемые эмпирические распределения являются нелинейными и относятся к определенному виду процессов и событий. Существование таких распределений является фундаментальной вероятностной закономерностью для многих процессов в природе и обществе.

**Выявление взаимосвязи сложных событий.** В качестве примера рассмотрим процесс построения эмпирических распределений на основании данных статистического учета о биологических чрезвычайных ситуациях [11]. На рисунке 1 представлены результаты обработки данных о биологических ЧС методом пробит-анализа.

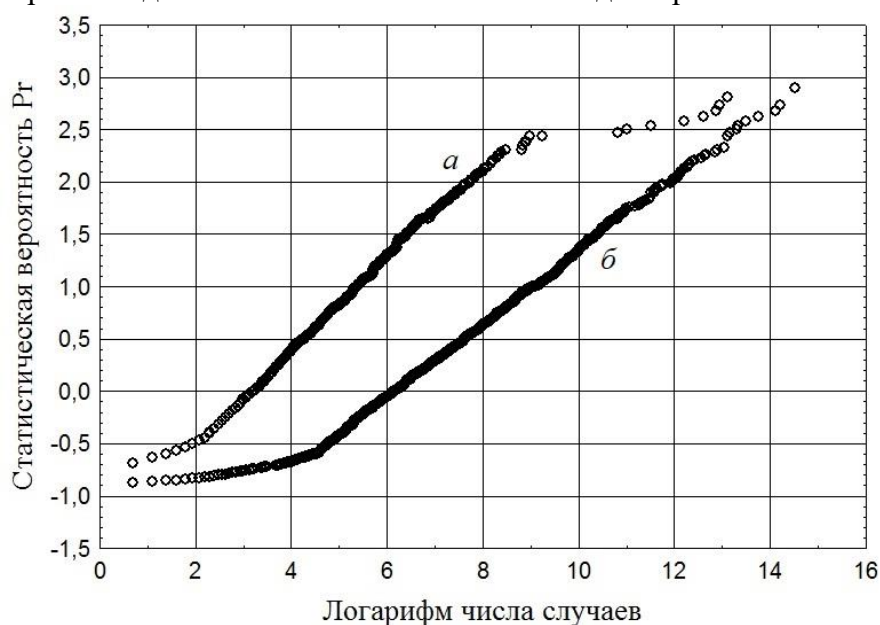


Рис. 1. Статистические распределения опасных событий при совершении чрезвычайных биологических ситуаций:  $a$  – число погибших людей;  $b$  – число пострадавших людей

Как видно из рисунка 1, полученные распределения достаточно хорошо описываются регрессионными зависимостями:

- распределения событий для погибших людей в результате стихийного бедствия:

$$\text{Pr}_s = -1,353 + 0,436 \ln N_s; \quad (2)$$

- распределения событий для пострадавших людей:

$$\text{Pr}_p = -2,017 + 0,333 \ln N_p, \quad (3)$$

где  $N_s$  – число погибших людей в результате стихийного бедствия;  $N_p$  – число пострадавших людей, которые имеют телесные повреждения, травмы или заболевания. Количество обработанных данных – 1619 случаев, коэффициенты корреляции зависимостей (2) и (3) составили 0,98 и 0,99 соответственно.

Полученные распределения тесно связаны с логарифмически-нормальным распределением, хотя и отличаются наличием коэффициентов при логарифме. Аналогичным образом были получены статистические распределения для других групп опасных процессов при совершении ЧС: климатических, геофизических, гидрологических и т.д.

Выявление взаимосвязи сложных событий основывалось на использовании единообразного вида распределений для погибших и пострадавших людей, построенных в одинаковых координатах пробит вероятности – логарифм числа случаев. Например, для распределений (2) и (3) уравнения связи будут иметь вид:

$$Pr_p = -0,983 + 0,764 Pr_s, \quad (4)$$

$$Pr_s = 1,287 + 1,309 Pr_p. \quad (5)$$

Статистические связи устанавливаются исходя из линейного вида функциональных зависимостей, представленных на рисунке 1 и описанных уравнениями связи вида (4) или (5).

Таким образом, неоднородные опасные события распределены по статистическим законам, которые могут быть найдены эмпирически путем непосредственного подсчета вероятностей событий, при этом разнородные по масштабу и содержанию события могут быть связаны между собой вероятностными закономерностями.

Анализ имеющихся данных о чрезвычайных ситуациях, произошедших в Российской Федерации, также позволяет оценить статистические распределения по чрезвычайным ситуациям и их последствиям. Данные охватывали информацию по видам ЧС и их последствиям для 85 субъектов РФ за 2009–2022 годы [12].

Результаты анализа для принятой сегодня в РФ классификации ЧС представляются различными видами статистических распределений. Для техногенных ЧС и ЧС всех видов в целом (общее количество ЧС по регионам) распределения представляются экспоненциальными законами. Для природных и биолого-социальных ЧС в этом случае статистические распределения не удалось определить.

Для последствий реализации событий были найдены эмпирические распределения. Количество погибших и пострадавших людей распределены согласно эмпирических законов:

- распределения событий для погибших людей в результате стихийного бедствия:

$$Pr_s = -1,752 + 1,012 \ln N_s; \quad (6)$$

- распределения событий для пострадавших людей:

$$Pr_p = -0,674 + 0,457 \ln N_p. \quad (7)$$

Количество обработанных данных – 398 случаев для 85 субъектов РФ, результаты анализа данных приведены на рисунке 2.

Для материального ущерба было определено эмпирическое распределение в виде:

$$Pr_u = -2,089 + 0,782 \ln \frac{M}{M_0}; \quad (8)$$

где  $M$  – материальный ущерб от ЧС, млн. руб.;  $M_0=37,74$  млн. руб. – значение ущерба, оцененное для ЧС в Московской области в 2009 году. Коэффициенты корреляции зависимостей (6)–(8) лежат в диапазоне 0,97–0,98.

В свою очередь взаимосвязь сложных событий с учетом распределений (6) и (7) выражается зависимостями:

$$Pr_p = 0,119 + 0,452 Pr_s,$$

$$Pr_s = -0,264 + 2,214 Pr_p.$$

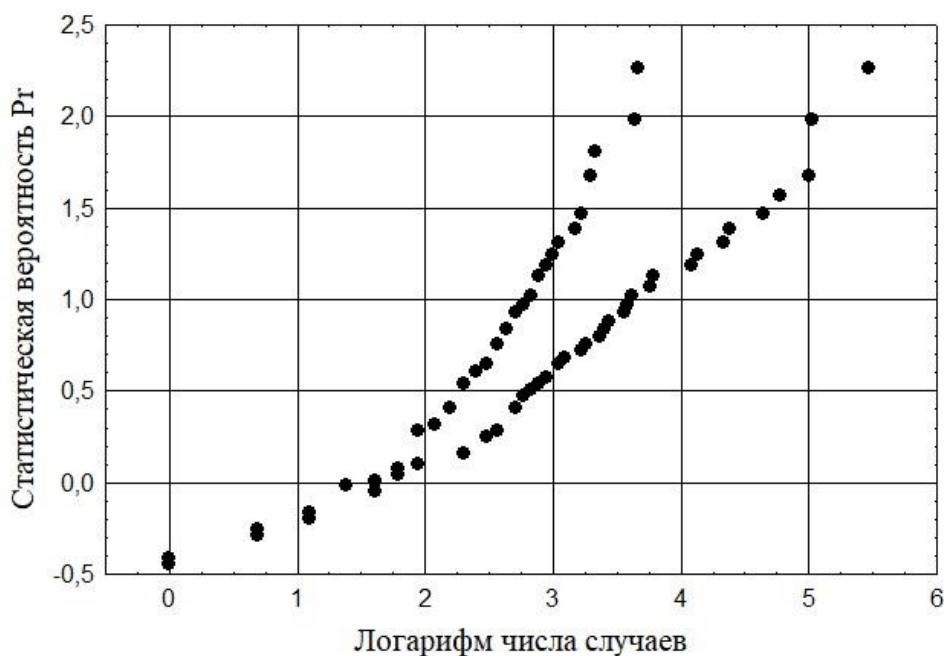


Рис. 2. Статистические распределения опасных событий при совершении чрезвычайных ситуаций в РФ:  $a$  – количество погибших людей;  $b$  – количество пострадавших людей

**Выводы.** Результаты исследований позволяют сделать вывод, что неоднородные сложные события, инициирующие чрезвычайные ситуации, и последствия этих событий распределены по статистическим законам, которые могут быть найдены эмпирическим путем. При этом количественные методы сравнения событий могут быть основаны на представлении распределений таких событий в едином функциональном виде и общем координатном пространстве пробит вероятности – логарифм числа случаев.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Alvarez, G. Operational Risk Quantification: Mathematical Solutions for Analyzing Loss Data / G. Alvarez // Response to the 2001 Basel Committee on Banking Supervision Consultative Document on Operational Risk. – 2001. – 18 p.
2. Управление рисками организаций. Интегрированная модель. Краткое изложение. Концептуальные основы. – Проектный консультативный совет COSO, США, 2004. – 111 с.
3. Постановление Правительства РФ от 21.05.2007 №304 «О классификации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера»: с изменениями и дополнениями от 20.12.2019. – 2 с.
4. Приказ МЧС России от 05.07.2021 №429 «Об установлении критериев информации о чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера». – 18 с.
5. ГОСТ Р 22.0.03–2020. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Природные чрезвычайные ситуации. Термины и определения: национальный стандарт РФ: дата введения 2021-04-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – Изд. официальное. – М: Стандартинформ, 2020. – 10 с.
6. Федеральный закон от 21.12.1994 №68-ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера»: в ред. от 14.04.2023. – 27 с.

7. Тарасов, Е. А. Классификация чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера // Е. А. Тарасов // Гражданская оборона и защита от чрезвычайных ситуаций в учреждениях, организациях и на предприятиях. – №2. – 2020. – С. 3–16.
8. Критерии значимости событий. [Электронный ресурс] / Википедия [Сайт]. – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Википедия:Критерии\\_значимости\\_событий](https://ru.wikipedia.org/wiki/Википедия:Критерии_значимости_событий) (дата обращения 02.04.2024).
9. Плэтт В. Информационная работа стратегической разведки / В. Плэтт. – М.: Изд-во Ин. лит-ры, 1958. – 341 с.
10. Вентцель, Е. С. Теория вероятности / Е. С. Вентцель. – М.: Наука, 1969. – 576 с.
11. EM-DAT. The International Disaster Database. CRED [Сайт]. – URL: <https://www.emdat.be/> (дата обращения 30.06.2023).
12. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2009–2022 годах». – М.: МЧС России, ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2023 г.
13. Звягинцева, А. В. Вероятностные методы комплексной оценки природно-антропогенных систем / А. В. Звягинцева. – М.: Спектр, 2016. – 256 с.
14. Аверин, Г. В. Системодинамика: теория и приложения / Г. В. Аверин. – Изд. 2-е перераб. и доп. – Донецк: ООО «НПП «Фолиант», 2022. – 535 с.

*Поступила в редакцию 05.06.2024 г., рекомендована к печати 20.06.2024 г.*

## IDENTIFYING THE RELATIONSHIP OF COMPLEX EVENTS BY EXAMPLE ANALYSIS OF STATISTICAL DATA ON EMERGENCY SITUATIONS

*Zviagintseva A.V., Guchmazova T.K., Klemeniuk R.V.*

One of the most important scientific tasks of mathematical statistics and event assessment is to study the cause-and-effect relationships in complex events that have occurred, the totality of which belong to the same type. Usually such events have meaningful definitions, but these definitions are not based on a systematic approach, they are linguistic (linguistic) concepts and almost always relate to a particular subject area where they have different meanings and contents. The article is aimed at searching for quantitative methods and criteria for event-based assessment of complex events as a basis for their possible systematics in subject areas. Several ideas are presented aimed at studying the cause-and-effect relationships inherent in complex events. As an example, the subject area of civil protection against emergencies is taken, where there are extensive databases of statistical data.

**Keywords:** complex events, classification of events, causal relationships, statistical probabilities and distributions, methods of event assessment.

### **Звягинцева Анна Викторовна**

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

### **Zviagintseva Anna Viktorovna**

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

### **Гучмазова Тамара Константиновна**

аспирант кафедры физики неравновесных процессов, метрологии и экологии им. И.Л. Повха ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк  
E-mail: guchmazova@bk.ru

### **Guchmazova Tamara Konstantinovna**

Postgraduate student at Department of Physics of Nonequilibrium Processes, Metrology and Ecology named after I.L. Povkh of Donetsk State University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

### **Клеменюк Роман Владимирович**

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

### **Klemeniuk Roman Vladimirovich**

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



## РАЗРАБОТКА КАТЕГОРИАЛЬНЫХ ФИЛЬТРОВ ДАННЫХ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ НА ПРИМЕРЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ФОРМ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО СЕКТОРА ПЕНИТЕНЦИАРНОЙ СИСТЕМЫ

© 2024 Пономарёв Д.С.

---

В работе рассмотрена разработка и практическое применение одного из важных инструментов для информационных и аналитических систем – категориальных фильтров данных. Данные фильтры становятся особенно актуальными, когда следует сравнить выборки по определенным категориям, либо провести сравнение значений показателей текущего заданного периода времени относительно предыдущих. В качестве примера были рассмотрены статистические данные производственного сектора пенитенциарной системы. Рассмотрено взаимодействие с уже разработанными системами хранения и учета данных. Приведены примеры формирования архитектуры базы данных для проведения научных исследований и анализа данных с позиций реляционной теории. Рассмотрены алгоритмы реализации работы с базой данных и создания многомерных фильтров на примере языка программирования Python. Разработаны пользовательские интерфейсы.

**Ключевые слова:** производственный сектор, Python, SQL, базы данных, реляционная теория, системный анализ, пенитенциарная система.

---

**Введение.** В последние годы наблюдается значительное увеличение объема отчетных статистических данных, учитываемых и обрабатываемых в пенитенциарной системе [1]. Производственный сектор в данном вопросе не является исключением: ведение отчетной документации по объемам производства, расходам, чистой прибыли, трудовым ресурсам, остаткам и количеству бракованной продукции – является важнейшей составляющей функционирования любого производства.

На сегодняшний день научно-исследовательскими подразделениями пенитенциарной системы уже разработаны системы учета и хранения статистических отчетных данных (далее – Хранилище данных) [2-4], однако, отсутствуют инструменты для их анализа и прогноза; отсутствуют также инструменты для поддержки принятия решений, анализа рисков, планирования ресурсов предприятий и отраслей. Также отсутствуют инструменты для быстрой предварительной подготовки и обработки данных. Имеющееся Хранилище данных позволяет лишь проводить запись и считывание данных, вопросы статистического и системного анализов остаются открытыми.

В работе рассмотрены самые первые ступени для разработки систем анализа данных: алгоритмы работы с базами данных (далее – БД) для проведения анализа, создание многомерных фильтров, позволяющих быстро обрабатывать данные в оперативной памяти, создание внешних пользовательских интерфейсов. Разработка велась на примере структур данных отраслевого производственного сектора пенитенциарной системы.

Основная цель данной работы – продемонстрировать процесс интеграции различных инструментов для создания простого и эффективного решения для управления данными статистических отчетных форм пенитенциарной системы.

**Архитектура БД.** Рассмотрим разработку архитектуры базы данных для проведения научных исследований и статистического анализа с позиций реляционной теории [5]. Согласно, разработанной ранее системе индексации данных для статистических отчетных форм [6], для анализа отраслевого сектора следует рассматривать следующие параметры, которые можно представить как множества ():

для трудовых ресурсов:

$$X_{m=1,p=7,o \in \{1,2,\dots,24\}}, \quad (1)$$

для производственных процессов:

$$X_{m=2,p=2,o \in \{1,2,\dots,37\}}, \quad (2)$$

рассматриваемый срез данных (исходя из отраслей производства) при этом будет:

$$Y_{u=2,v \in \{1,2,\dots,13\}}. \quad (3)$$

Срез отраслей производства можно также проводить при (4):

$$X_{m=2,p=1,o \in \{15,\dots,24\}} \wedge Y_{u=1,v \in \{1,2,\dots,14\}}, \quad (4)$$

в этом случае преимуществом будет возможность для отраслей производства рассмотреть дополнительно срезы данных по видам учреждений ( $Y_{u=1,v \in \{1,2,\dots,14\}}$ ), однако будет и недостаток – отсутствие возможности добавить данные по трудовым ресурсам (так как в рассматриваемых статистических отчетных формах учет данных по трудовым ресурсам одновременно в разрезе отраслей производства ( $Y_{u=2,v \in \{1,2,\dots,13\}}$ ) и видам учреждений ( $Y_{u=1,v \in \{1,2,\dots,14\}}$ ) – не предусмотрен). Поэтому в формировании БД для проведения исследования были рассмотрены только множества и срезы согласно (1-3).

На территориальном уровне наиболее подходящим для анализа отраслевого сектора будет разделение данных по Федеральным округам. Также можно рассмотреть срезы данных по временным отрезкам: по месяцам и по годам. В итоге, БД будет состоять как из категориальных данных, так и из числовых (рисунок 1).

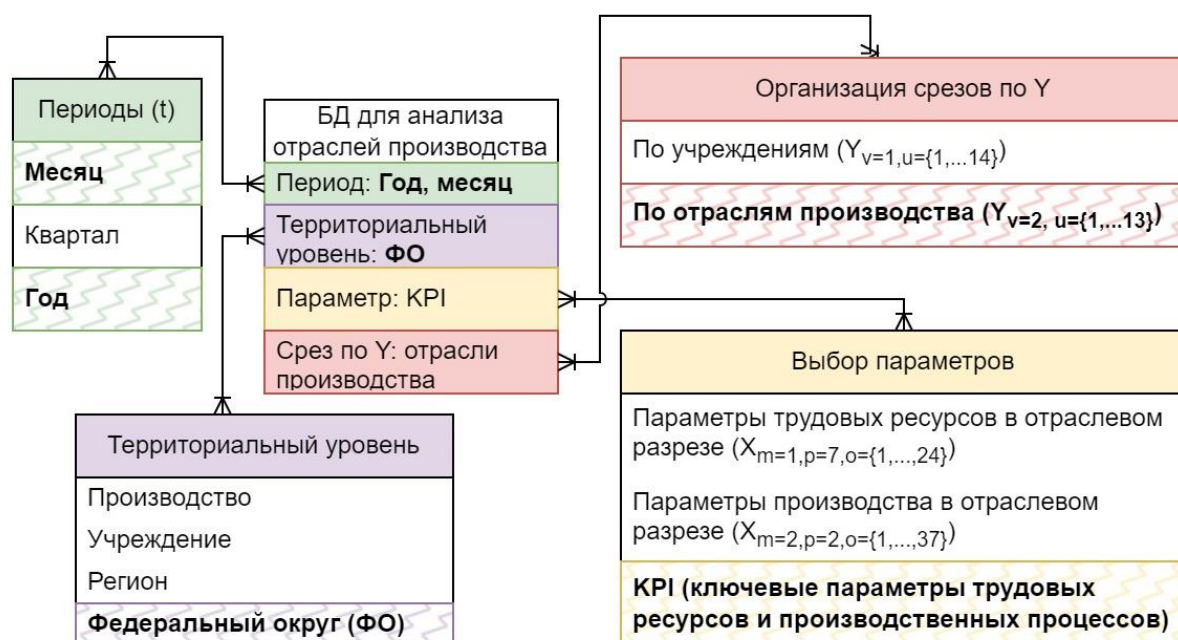


Рис. 1. Архитектура БД для проведения исследования

Из (1) и (2) рассмотрим наиболее интересные для производственных процессов параметры (в дальнейшем они могут быть интерпретированы как ключевые параметры эффективности (далее KPI [7])):  $X_{m=1,p=7,o=1}$  – среднесписочная численность трудоустроенного спецконтингента (чел.);  $X_{m=1,p=7,o=14}$  – количество отработанных часов в месяц (тыс. чел-часов);  $X_{m=2,p=2,o=1}$  – объем производства товаров (тыс. руб.);  $X_{m=2,p=2,o=26}$  – количество арендованного оборудования (ед.);  $X_{m=2,p=2,o=27}$  – оплата за аренду помещений в месяц (тыс. руб.);  $X_{m=2,p=2,o=28}$  – остатки готовой продукции на конец отчетного периода (тыс. руб.);  $X_{m=2,p=2,o=32}$  – объем бракованной продукции (тыс. руб.);  $X_{m=2,p=2,o=34}$  – чистая прибыль (тыс. руб.);  $X_{m=2,p=2,o=35}$  – объем заказов (заключенных контрактов) на производство продукции в рамках текущего года (тыс. руб.).

Стоит отметить, что могут быть выбраны и другие параметры для проведения исследования, в зависимости от поставленных целей и задач.

Из приведенных параметров, в рамках срезов по отраслям производства, федеральным округам, и отрезкам времени – может быть составлена БД для исследования. Непосредственно данная БД может быть записана на жесткий диск, после прохождения через многомерные фильтры данных – выборка уже будет храниться в оперативной памяти (RAM – random access memory) для более быстрой работы с данными (рисунок 2) [8].

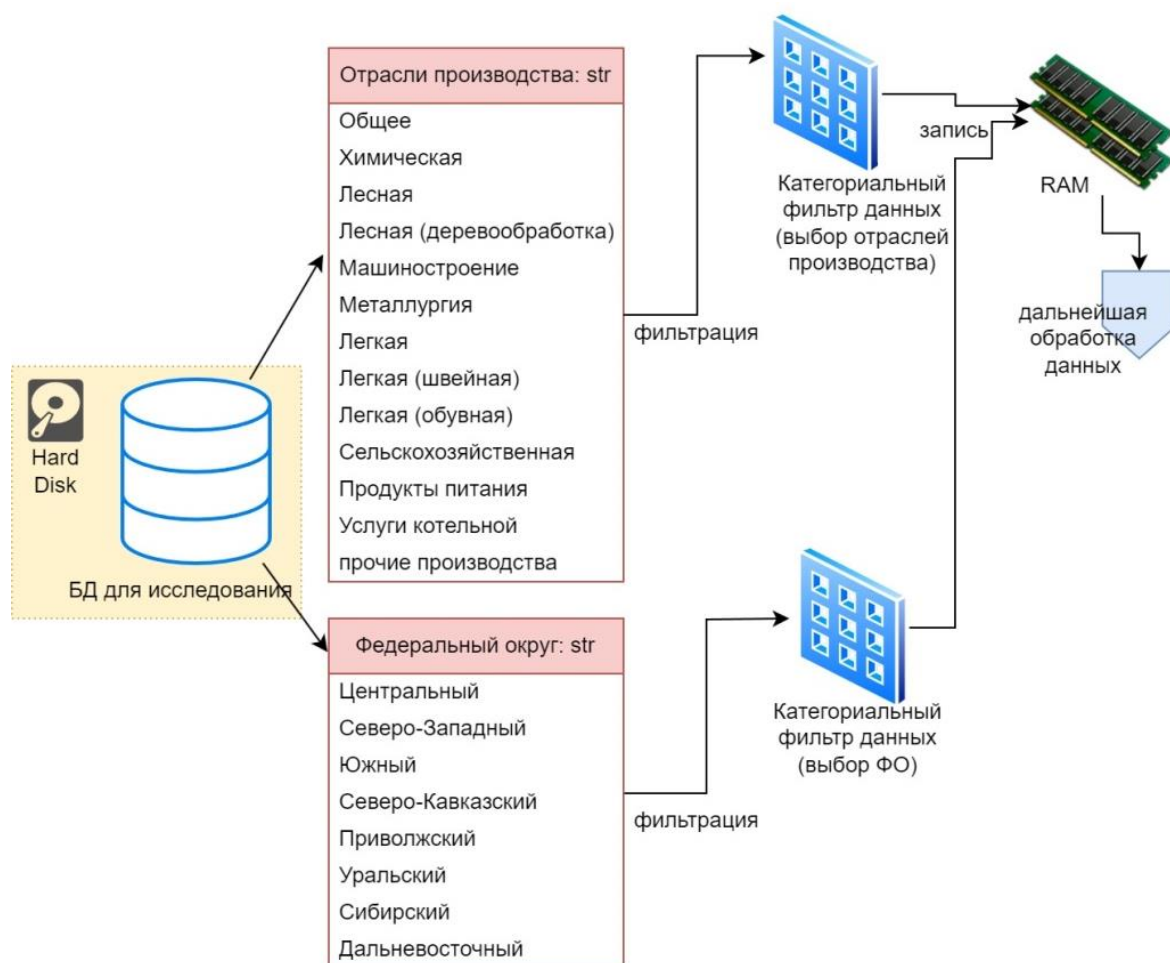


Рис. 2. Использование жесткого диска и оперативной памяти для развертывания БД и категориальных фильтров данных, а также для последующей обработки данных

Далее рассмотрим более подробно организацию работы с БД, а также разработку фильтров.

**Организация работы с БД.** Подключение к базе данных производится следующим образом (рассмотрено подключение на примере бессерверной базы данных SQLite [9] и библиотеки pandas [10]):

```
conn = sqlite3.connect('data.db')
c = conn.cursor()
создание таблицы, если она еще не создана:
c.execute("""
CREATE TABLE IF NOT EXISTS data (
    id INTEGER PRIMARY KEY,
    json_data TEXT
)
""")
```

где «`sqlite3.connect('data.db')`» – подключение к базе данных SQLite, находящейся в файле «`data.db`». Если файл базы данных не существует, он будет создан; «`conn.cursor()`» – создание курсора для выполнения SQL-запросов; «`c.execute(...)`» – выполнение SQL-запроса для создания таблицы `data`, если она еще не создана. Таблица имеет два столбца: `id` (целочисленный первичный ключ) и `json_data` (текстовое поле для хранения данных в формате JSON).

Также следует сделать возможность и очистки БД, сделаем интерфейс кнопки очистки данных при помощи библиотеки streamlit [11]:

```
if st.button("Очистить базу данных"):
    c.execute('DELETE FROM data')
    conn.commit()
    st.success("База данных успешно очищена")
```

где «`st.button("Очистить базу данных")`» – создание кнопки для очистки базы данных. Если кнопка нажата, выполняется SQL-запрос для удаления всех записей из таблицы `data`, и изменения сохраняются в базе данных с помощью «`conn.commit()`». Сообщение об успешном выполнении отображается пользователю.

Так как наиболее популярна выгрузка данных из Хранилища данных в формате `xlsx`-документов, рассмотрим добавление данных в нашу БД при помощи загрузки документов формата `xlsx`, заполненных согласно приведенным ранее формам:

```
uploaded_file = st.file_uploader("Загрузите файл Excel", type=["xlsx"])
if uploaded_file is not None:
    df = pd.read_excel(uploaded_file)
    st.write("Предпросмотр данных:", df)
```

где «`st.file_uploader("Загрузите файл Excel", type=["xlsx"])`» – создание элемента для загрузки формата `xlsx`, если файл загружен («`uploaded_file is not None`»), он читается с помощью функции `pd.read_excel`, и данные отображаются в приложении с помощью «`st.write`».

Сохранение данных в БД реализовано следующим образом:

```
if st.button("Сохранить данные"):
    c.execute('DELETE FROM data')
    conn.commit()
    for i, row in df.iterrows():
```

```

c.execute('INSERT INTO data (json_data) VALUES (?)', (row.to_json(),))
conn.commit()
st.success("Данные успешно сохранены")
    
```

где «*st.button("Сохранить данные")*» – создание кнопки для сохранения данных. Если кнопка нажата, выполняются следующие шаги:

1. очистка таблицы *data* (если она не была очищена ранее);
2. перебор всех строк *DataFrame df* с помощью метода «*iterrows()*»: для каждой строки вызывается метод «*to\_json()*», который преобразует строку в формат *JSON*; *SQL*-запрос «*INSERT INTO data (json\_data) VALUES (?)*» вставляет *JSON*-данные в таблицу;
3. изменения сохраняются в базе данных с помощью «*conn.commit()*»;
4. отображение сообщения об успешном сохранении данных.

Заккрытие соединения с базой данных проводится при помощи «*conn.close()*».

Проверка наличия загруженного файла:

```

if uploaded_file_xls is not None:
    df = pd.read_excel(uploaded_file_xls)
    
```

Проверка условия был ли загружен файл («*uploaded\_file\_xls is not None*») инициализирует загрузку файла если он отсутствует, файл считывается с помощью функции «*pd.read\_excel*» и данные приравниваются переменной *df*.

Обобщенный алгоритм (в упрощенном варианте) для организации работы с базой данных, согласно представленным скриптам, будет реализован следующим образом (рисунок 3).

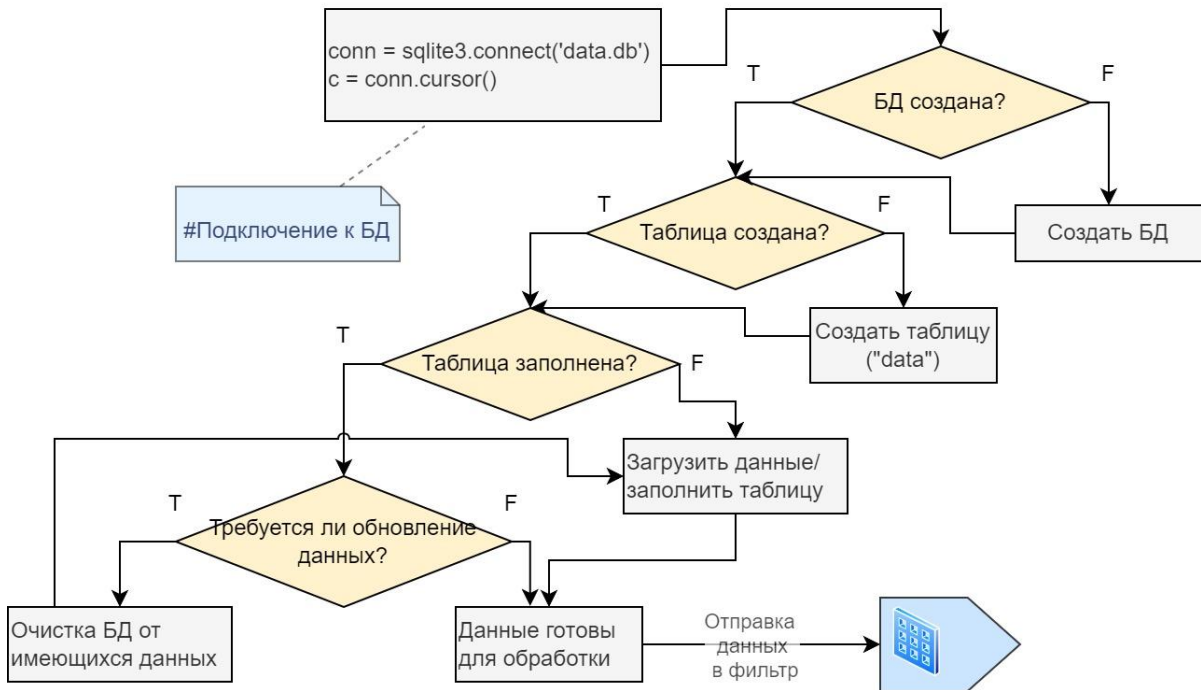


Рис. 3. Алгоритм организации работы с БД, согласно представленным скриптам

Дополнительно к представленному алгоритму были созданы поля предпросмотра загружаемых данных, заголовки, названия кнопок и пр. В результате, внешний интерфейс для реализации данного алгоритма выглядит следующим образом (на рисунке 4 далее представлено добавление и сохранение данных на примере формата *xlsx* в БД посредством записи в формат *JSON*).

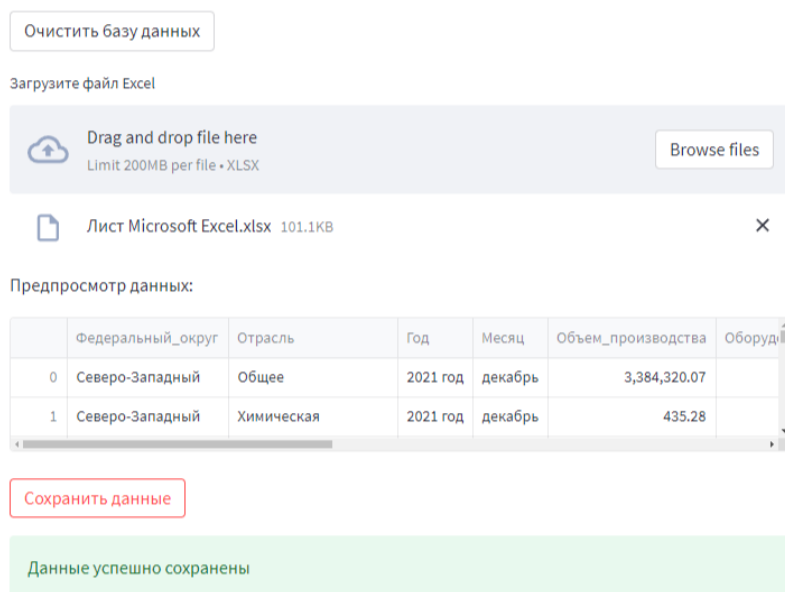


Рис. 4. Разработанный внешний интерфейс для загрузки, очистки и сохранения данных из Хранилища данных, согласно приведенным скриптам и алгоритму

Далее, более подробно разберем разработку многомерных фильтров категориальных данных.

**Разработка фильтров данных.** Рассмотрим создание категориальных фильтров, которые позволяют пользователю выбирать различные критерии для отображения данных:

```
region = st.sidebar.multiselect(
    "Выберите Федеральный округ",
    options=df["Федеральный_округ"].unique(),
    default=df["Федеральный_округ"].unique(),
)
construction = st.sidebar.multiselect(
    "Выберите отрасль производства",
    options=df["Отрасль"].unique(),
    default=df["Отрасль"].unique(),
)
```

Также можно рассмотреть как категориальные данные интервалы учета параметров – «Год» и «Месяц». Хотя в Python и существует тип данных «date», в данном случае он не рассматривался, так как информация из Хранилища выгружается без формата «date» и пользователям не всегда удобно работать с этим типом данных. В этом случае, для интервалов учета параметров можно сделать следующие фильтры:

```
Year = st.sidebar.multiselect(
    "📅 Выберите год",
    options=df["Год"].unique(),
    default=df["Год"].unique(),
)
Month = st.sidebar.multiselect(
    "📅 Выберите месяц",
    options=df["Месяц"].unique(),
    default=df["Месяц"].unique(),
)
```

где «*st.sidebar.multiselect*» создает многократные выборы (*checkboxes*) в боковой панели для фильтрации данных по выбранным столбцам: "Федеральный\_округ", "Отрасль", "Год" и "Месяц". Пользователь может выбрать одно или несколько значений из каждого столбца.

Фильтрация данных по выбранным критериям:

```
df_selection = df.query("Федеральный_округ==@region & Год==@Year &
Месяц==@Month & Отрасль==@construction")
```

«*df.query*» используется для фильтрации *DataFrame df* по выбранным значениям фильтров. Здесь используется синтаксис выражений в строках с помощью «@» для ссылки на переменные *Python*. В контексте использования метода «*query*», «@» – служит для ссылки на внешние переменные в строке запроса. Это означает, что «@» используется для передачи значений переменных *Python* внутрь строки запроса «*query*».

Возможно также сделать дополнительный фильтр для годового среза. Он нужен будет например для того чтоб сравнить интересующие показатели текущего года относительно предыдущего (причем, разработанный инструмент получается достаточно пластичным: так как можно выбрать только определенные месяцы, отрасли производства и федеральные округа для сравнения). Скрипт для дополнительного фильтра годового среза представлен далее:

```
Year_exp = st.sidebar.multiselect(
    "ДОПОЛНИТЕЛЬНО: выберите годовой сравнительный срез:",
    options=df["Год"].unique(),
    default=df["Год"].unique()
)
```

```
df_selection_exp = df.query("Федеральный_округ==@region & Год==@Year_exp &
Месяц==@Month & Отрасль==@construction")
```

В итоге, внешний интерфейс фильтров данных, с учетом представленных скриптов, будет выглядеть следующим образом (рисунок 5).

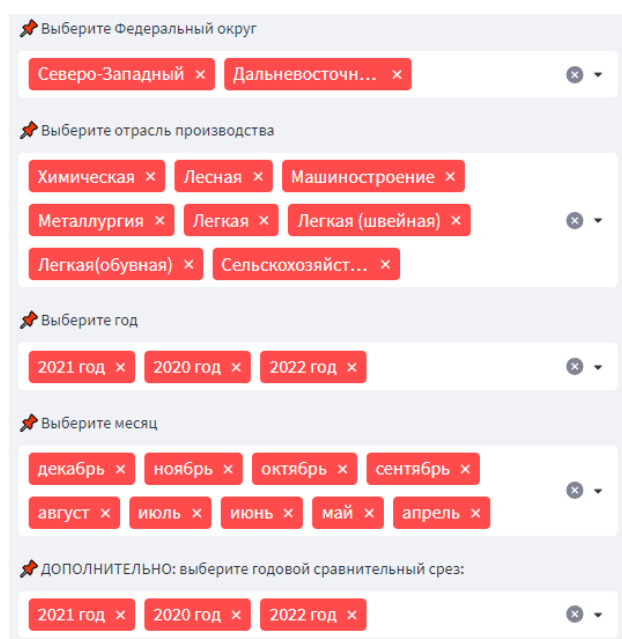


Рис. 5. Разработанный внешний интерфейс для фильтрации данных по категориям: отрасли производства, год, месяц, федеральный округ

Практический пример и тесты производительности. Рассмотрим выборку из 10 тыс. точек, записанных в базу данных, которая соответствует архитектуре, описанной ранее (данные были собраны за 5 лет). В тестах была использована оперативная память объемом 8 ГБ (в один канал), DDR4, работающая на частоте 3200 МГц в купе с процессором Ryzen 5 5600. Для замеров был использован модуль Python «time». В результате проведенных тестов было установлено, что время получения отфильтрованных данных для дальнейшего использования не превышает 0,1 секунды. Таким образом, благодаря проведенным тестам и полученным результатам, можно резюмировать, что разработанные инструменты для фильтрации данных могут быть применены в практической деятельности, а также дальнейшей разработке информационных систем для производственного сектора.

**Заключение.** Не смотря на существующие разработки в области информационных технологий, создание инструментов для проведения статистического и системного анализов для производственного сектора – остаются как никогда актуальными.

В работе был предложен ряд подходов для создания инструментов предварительной подготовки данных (в частности – категориальных фильтров данных) при помощи языка Python и его библиотек, а также бессерверной СУБД. Рассмотрена запись данных в БД при помощи формата *JSON*. Представлены алгоритмы загрузки и обработки данных с примерами кода на *Python*. Разработан внешний пользовательский интерфейс для быстрой и удобной работы с исследуемыми данными.

Разработка была сделана на примере статистических данных производственного сектора пенитенциарной системы. Благодаря проведенным тестам на производительность была доказана практическая применимость разработанных инструментов. Применение категориальных фильтров позволяет также сравнить текущие значения параметров с прошлогодними. Разработка фильтров – является важной задачей при создании выборок для проведения машинного обучения и сравнительного анализа данных.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Производственная и трудовая деятельность как фактор медико-социальной адаптации осужденных: отчет о НИР / Д. С. Пономарев, М. М. Горохов, С. Б. Пономарев, И. В. Разумова. – Федеральное казенное учреждение «Научно-исследовательский институт Федеральной службы исполнения наказаний», 2022. – С. 5-40.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015612855. Стат.Оператор : № 2014663634 : заявл. 26.12.2014 : опубл. 26.02.2015 ; заявитель Федеральное казенное учреждение «Научно-исследовательский институт информационных технологий Федеральной службы исполнения наказаний» (ФКУ НИИИТ ФСИН России). – EDN KHWEMU.
3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015612075. Стат.Проект : № 2014663715 : заявл. 26.12.2014 : опубл. 11.02.2015 ; заявитель Федеральное казенное учреждение «Научно-исследовательский институт информационных технологий Федеральной службы исполнения наказаний» (ФКУ НИИИТ ФСИН России). – EDN GHRZEY.
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015612427. Стат.Аналитик : № 2014663636 : заявл. 26.12.2014 : опубл. 18.02.2015 ; заявитель Федеральное казенное учреждение «Научно-исследовательский институт информационных технологий Федеральной службы исполнения наказаний» (ФКУ НИИИТ ФСИН России). – EDN WLOOLP.
5. Date, C. J. SQL and Relational Theory / C. J. Date. – O'Reilly, 2010. – 474 p.
6. Пономарев, Д. С. Разработка систем индексации данных для производственно-экономического и трудового секторов пенитенциарной системы / Д. С. Пономарев // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 3(111). – С. 100-108. – EDN CAZJLC.



7. Marr, B. Key Performance Indicators (KPI): The 75 measures every manager needs to know / B. Marr. – Financial Times Press, 2012. – 347 p.
8. Tiago, R. A. Fast Python: High performance techniques for large datasets / R. A. Tiago. – Manning, 2023. – 304 p.
9. Kreibich, J. Using SQLite: Small. Fast. Reliable. Choose Any Three / J. Kreibich. – O'Reilly Media, 2010. – 526 p.
10. Harrison, M. Effective Pandas: Patterns for Data Manipulation / M. Harrison. – Independently published, 2021. – 497 p.
11. Khorasani, M. Web Application Development with Streamlit / M. Khorasani, M. Abdou, J. H. Fernandez. – Apress, 2022. – 508 p.

*Поступила в редакцию 13.06.2024 г., рекомендована к печати 28.06.2024 г.*

**DEVELOPMENT OF CATEGORY DATA FILTERS FOR INFORMATION PROCESSING ON THE EXAMPLE OF STATISTICAL FORMS OF THE PRODUCTION SECTOR OF THE PENITENTIAL SYSTEM**

**Ponomarev D.S.**

The work discusses the development and practical application of one of the important tools for information and analytical systems - categorical data filters. These filters become especially relevant when you need to compare samples by certain categories, or compare the values of indicators of the current specified period of time relative to previous ones. As an example, statistical data from the production sector of the penitentiary system were considered. Interaction with already developed data storage and accounting systems is considered. Examples are given of the formation of a database architecture for conducting scientific research and data analysis from the perspective of relational theory. Algorithms for implementing work with a database and creating multidimensional filters are considered using the example of the Python programming language. User interfaces developed.

**Keywords:** manufacturing sector, Python, SQL, databases, relational theory, systems analysis, penitentiary system.

**Пономарёв Дмитрий Сергеевич**

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник филиала (г. Ижевск) ФКУ «Научно-исследовательский институт Федеральной службы исполнения наказаний», доцент кафедры водоснабжения и водоподготовки ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», Российская Федерация, Удмуртская Республика, г. Ижевск.  
E-mail: ponomarev.dmitry1990@mail.ru

**Ponomarev Dmitrii Sergeevich**

Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher of the Branch (Izhevsk) of the Federal Penitentiary Service of Russia, Associate Professor of Izhevsk State Technical University, Russian Federation, Udmurt Republic, Izhevsk.

## ОСНОВЫ ИНФОРМАЦИОННО–ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В АСУ И АСНИ

© 2024 Подлесный В.Ю., Данилов В.В., Третьяков И.А., Колесник Е.В.

---

В настоящей работе рассмотрены информационные характеристики измерительных сообщений, в частности, модели измерительных сообщений, модели стационарных случайных процессов, модели нестационарных процессов (измерительных), погрешности при их измерениях и передаче.

**Ключевые слова:** АСУ, АСНИ, информационное обеспечение, измерительные сообщения, информационные характеристики.

---

**Введение.** Повсеместный рост применения автоматизированных систем управления (АСУ) и автоматизированных систем научных исследований (АСНИ) в современных производственных процессах невозможен без постоянного качественного улучшения их информационно-измерительных систем (ИИС) и подсистем [1-4]. Наиболее продуктивно совершенствование ИИС не путем улучшения ее элементной базы, устройств, блоков и т.п., а путем внедрения результатов синтеза знаний фундаментальных и прикладных наук, что может привести к внедрению информационно-измерительных технологий.

По-видимому, этим обстоятельством и объясняется тот факт, что, несмотря на острую потребность в совершенствовании основ (теория и методы расчета) ИИС, трудно указать источник знаний, где эти вопросы рассмотрены достаточно глубоко, но в то же время не на уровне чистой теории, а с позиций создания практических основ для проектирования ИИС АСУ и АСНИ.

Структуры информационно-измерительных систем (ИИС), различных АСУ и АСНИ, представлены в [5-10], их классификация приведена в [7, 11, 12]. Далее, рассмотрим собственно измерительные системы и их сигналы. Если измерительная информация (сообщение) на входе, описывается непрерывной функцией времени, то на выходе ИИС, должно гарантироваться восстановление его во времени с наперед заданной верностью. Из множества разновидностей ИИС по своему функциональному назначению и их устройств, образующих информационный тракт системы, рассмотрим только те, где осуществляется функции представления, сбора, передачи и обработки сообщений. Модель такой ИИС представлена в [5].

Можно характеризовать априори поведение сигнала и шума лишь в среднем по времени на участках наибольшей динамичности (экстремальные свойства). В соответствии с чем, модели сигналов и шума в ряде случаев являются приближенными, особенно для нестационарных процессов. В этом случае оптимизация системы на моделях не гарантирует ее оптимальности для конкретных реализаций сигналов и шума.

---

*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).*

---

Средством для преодоления этого недостатка является придание системе свойств адаптации. Адаптация осуществляется путем автоматического управления некоторыми параметрами устройств, образующих информационный тракт ИИС.

**Модели измерительных сообщений.** Сообщения, описываемые непрерывной функцией времени  $\lambda(t)$ , является основными наиболее сложным в измерительной технике. Сообщение на выходе, одного первичного преобразователя (ПП) являются реализациями некоторого, в общем случае нестационарного случайного процесса  $\Lambda(t)$ .

Случайный процесс  $\Lambda(t)$  на выходе линейной динамической системы, на вход которой подается белый шум  $N(t)$  в общем случае, можно описать стохастическим дифференциальным уравнением [5]:

$$\Lambda^{(k)}(t) + a_{k-1}(t)\Lambda^{(k-1)}(t) + \dots + a_0(t)\Lambda(t) = b_{k-1}(t)N^{(k-1)}(t) + \dots + b_0(t)N(t), \quad (1)$$

где  $a_i(t)$ ,  $b_i(t)$  - в общем случае, переменные коэффициенты;  $\Lambda^{(k)}(t)$  -  $k$ -я производная от  $\Lambda(t)$ . При  $a_i(t) = a_i$ ,  $b_i(t) = b_i$ , уравнение будет линейным с постоянными коэффициентами. Всегда можно преобразовать дифференциальное уравнение  $k$ -го порядка, в векторное  $k$ -мерное дифференциальное уравнение первого порядка. Случайный процесс, описываемый линейным дифференциальным уравнением  $k$ -го порядка или задан дробно-рациональной спектральной плотностью  $S_\lambda(\omega)$ , может быть представлен в виде отдельной компоненты или линейной комбинации нескольких компонент векторного марковского процесса [13].

Предположим, процесс является решением линейного стохастического дифференциального уравнения (1)  $k$ -го порядка, тогда в установившемся режиме спектральная плотность мощности процесса  $\Lambda(t)$  будет определяться выражением:

$$S_\lambda(\omega) = |W(j\omega)|^2 N_0^2 = \left| \frac{B(j\omega)}{A(j\omega)} \right|^2 N_0^2, \quad (2)$$

где  $A(j\omega) = (j\omega)^k + a_{k-1}(j\omega)^{k-1} + \dots + a_0$ ;  $B(j\omega) = b_{k-1}(j\omega)^{k-1} + b_{k-2}(j\omega)^{k-2} + \dots + b_0$ ;  $W(j\omega)$  - комплексный коэффициент передачи рассматриваемой динамической схемы. Степень числителя  $B(j\omega)$  должна быть, по крайней мере, на единицу ниже степени знаменателя, для рационального спектра.

Одним из преимуществ этого метода описания случайных процессов является то, что, если рассматриваемое дифференциальное уравнение трудно решается аналитически, оно может быть решено на ЭВМ. Также, данный метод описания случайных процессов позволяет любой случайный процесс с заданной степенью точности аппроксимировать марковским случайным процессом соответствующего порядка.

**Стационарные случайные процессы.** Процесс  $\Lambda(t)$  на выходе динамической системы, описываемой линейным дифференциальным уравнением (1), будет стационарным, если оператор системы инвариантен во времени, т. е. величины коэффициентов  $a_i(t)$ ,  $b_i(t)$  и степень  $k$  являются константами.

Предположим, что правая часть уравнения (1)  $X(t) = b_{l-1}N^{(k-1)}(t) + \dots + b_0N(t)$  описывает физические возмущения, действующие на вход определенной физической системы (объект + ПП), заданной дифференциальным уравнением:

$$\Lambda^{(k)}(t) + a_{k-1}(t)\Lambda^{(k-1)}(t) + \dots + a_0(t)\Lambda(t) = X(t), \quad (3)$$

при этом, измерительное сообщение  $\lambda(t)$  на выходе ПП, содержит информацию об объекте и подлежащее передаче в ИИС.

Для физически реализуемого процесса спектральная плотность является асимптотически убывающей функцией частоты, поэтому если спектральная плотность процесса  $X(t)$  априори неизвестна, то можно считать, что  $X(t) = b_0 N(t)$ , т. е. является усиленным с коэффициентом  $b_0$  белым шумом с постоянной спектральной плотностью  $S_x(\omega) = b_0^2 N_0^2 (\omega \geq 0)$  в бесконечной полосе частот. Тогда, согласно (2) получим:

$$S_\lambda(\omega) = |W(j\omega)|^2 N_0^2 = \left| \frac{b_0}{A(j\omega)} \right|^2 N_0^2. \quad (4)$$

т.е. спектральная плотность сообщения по-прежнему совпадает (с точностью до коэффициента) с квадратом модуля комплексного коэффициента передачи физической системы. На выходе ПП, сообщение представляет произведение вида  $W(j\omega) = W_{os}(j\omega)W_{nn}(j\omega)$ , где  $W_{os}(j\omega)$ ,  $W_{nn}(j\omega)$  - комплексные коэффициенты передачи объекта и первичного преобразователя.

Случай, когда оценка  $W_{os}(j\omega)$  известна, даже в приближении, ПП выбирается исходя из того, чтобы  $|W_{nn}(j\omega)| \approx 1$  в пределах частотной полосы пропускания объекта, т.е.  $|W(j\omega)| \approx |W_{os}(j\omega)|$ .

Проиллюстрируем вышесказанное примерами. Полагая  $X(t) = b_0 N(t)$ , коэффициенты  $b_0$  выберем, таким образом, чтобы дисперсия выходного процесса была

равна  $\sigma_\lambda^2 = 1/(2\pi) \cdot \int_0^\infty S_\lambda(\omega) d\omega = 1$ , где  $S_\lambda(\omega)$  - односторонняя спектральная

плотность мощности выходного процесса.

Пример 1. Рассмотрим процесс, в котором (3), является уравнением 1-го порядка ( $k=1$ ), т.е.  $\Lambda'(t) + \Omega_c \Lambda(t) = \sqrt{2\Omega_c} N(t) / N_0$ .  $\Omega_c = a_0$ . Устойчивость решения обеспечивается существованием действительной части отрицательных корней характеристического уравнения, и он здесь один:  $k_1 = -\Omega_c$ . Воспользовавшись (2), имеем:  $W(j\omega) = \sqrt{2\Omega_c} / [(j\omega + \Omega_c)N_0]$ ,  $-\infty < \omega < \infty$ .

Обратное интегральное преобразование Фурье от  $W(j\omega) = \int_0^\infty W(t)e^{-i\omega t} dt$  есть весовая импульсная функция  $W(t)$  которая в данном случае будет иметь вид:

$$W(t) = 1/(2\pi) \cdot \int_{-\infty}^\infty W(j\omega)e^{i\omega t} d\omega = (1/N_0) \cdot \sqrt{2\Omega_c} e^{-\Omega_c t}; \quad t > 0.$$

Учитывая (4), найдем спектральную плотность мощности процесса:

$$S_\lambda(\omega) = |W(j\omega)|^2 N_0^2 = (4\Omega_c) / (\Omega_c^2 + \omega^2); \quad \omega \geq 0. \quad (5)$$

Обратное преобразование Винера - Хинчина, даст нормированную корреляционную функцию ( $\sigma_\lambda^2 = 1$ ):

$$r_\lambda(\tau) = [1/(2\pi) \cdot \int_0^\infty S_\lambda(\omega) \cos \omega \pi d\omega / 1/(2\pi) \cdot \int_0^\infty S_\lambda(\omega) d\omega] = e^{-\Omega_c |\tau|}. \quad (6)$$

Полученная корреляционная функция (6), по форме, совпадает с весовой. По уровню 0,5 оценка ширины спектра рассмотренного процесса определяется в виде  $\Delta\omega_{эфф} = \Omega_c \pi / 2$ ;  $\Delta\omega_{0,5} = \Omega_c$ .

Пример 2. Рассмотрим вариант, когда уравнение (3) – уравнение второго порядка ( $k=2$ ), т.е.  $\Lambda''(t) + a_1 \Lambda'(t) + a_0 \Lambda(t) = \sqrt{2a_0 a_1} N(t) / N_0$ .

Как предложено в [14], уравнение может характеризовать зависимость виброускорений [ $\Lambda(t)$ ] на стенках корпусов дизельного двигателя и коробки передач от ударных воздействий [ $X(t)$ ] соответственно на шатунную шейку коленчатого вала и одну их шестерёнок. Условиями устойчивости, видимо, будет:  $\begin{cases} a_1 > 0 \\ a_0 > 0 \end{cases}$ . При наличии

белого шума и условий устойчивости, весовая импульсная функция равна:

$$W(t) = [\sqrt{2a_0 a_1} / N_0] / [(a_0 - \omega^2) + j\omega a_1]; \quad -\infty < \omega < +\infty,$$

что позволяет, учитывая (4) найти решение для спектральной плотности процесса:

$$S_\lambda(\omega) = [8\Omega_c^3 \xi] / [(\omega^2 - \Omega_c^2)^2 + 4\Omega_c^2 \omega^2 \xi^2]; \quad \omega \geq 0, \quad (7)$$

где  $\xi = a_1 / \sqrt{4a_0} > 0$  и  $\Omega_c = \sqrt{a_0}$  - обозначения, введённые по аналогии с колебательным контуром [15].

Далее возможны несколько следующих частных вариантов. Частный вариант 1:

$$a_1^2 - 4a_0 = 4\Omega_c^2 (\xi^2 - 1) < 0, \quad (8)$$

следовательно,  $0 < \xi < 1$ .

Из (7), аналогично (6), получим при  $\sigma_\lambda^2 = 1$  нормированную корреляционную функцию:

$$r_\lambda(\tau) = e^{-\beta |\tau|} (\cos \omega_c \tau + \frac{\beta}{\omega_c} \sin \omega_c |\tau|), \quad (9)$$

где  $\omega_c$  - собственная частота системы:

$$\omega_c = (a_0 - a_1^2 / 4)^{0,5} = \Omega_c (1 - \xi^2)^{0,5}, \quad (10)$$

$$\beta = \Omega_c \xi. \quad (11)$$

Весовую импульсную функцию (12) найдем, применяя к  $W(j\omega)$  обратное интегральное преобразование Фурье:

$$W(t) = (2\Omega_c \beta^{0,5}) / (\omega_c N_0) \cdot e^{\beta t} \sin \omega_c t; \quad t \geq 0, \quad (12)$$

Частный вариант 1а: сделаем допущение  $0 < \xi \leq 1$ . Учитывая (10) и (11)  $\omega_c = \Omega_c$ ;  $\beta / \omega_c \approx \beta / \Omega_c \leq 1$  и из (9), имеем нормированную корреляционную функцию:

$$r_\lambda(\tau) \approx e^{-\beta|\tau|} \cos \Omega_c \tau.$$

Следовательно, условие  $\xi \leq 1$  приводит к не дифференцируемому случайному процессу  $\Lambda(t)$ , тогда как в предыдущем случае процесс является однократно дифференцируемым в среднем квадратическом, что легко установить, находя производные в нуле корреляционных функций.

Частный вариант 1б: наложим на коэффициенты исходного дифференциального уравнения условие  $a_1^2 = 2a_0$ . При этом  $a_1^2 - 4a_0 = -2a_0 < 0$ , т.е. условие (8) выполнено. В этом случае (являющимся разновидностью предыдущего), можно пользоваться решениями, полученными для случая  $0 < \xi \leq 1$ . Из (7) и (9) находим (учитывая,  $\xi = a_1 / (4a_0)^{0,5} = 1 \cdot 2^{0,5}$ ) спектральную плотность процесса:

$$S_\lambda(\omega) = (4 \cdot 2^{0,5} / \Omega_c) / [1 + (\omega / \Omega_c)^4]; \quad \omega \geq 0. \quad (13)$$

Нормированная корреляционная функция будет соответственно равна:

$$r_\lambda(\tau) \approx \exp(-\Omega_c |\tau| / \sqrt{2}) [\cos(\Omega_c \tau) / \sqrt{2} + \sin(\Omega_c |\tau|) / \sqrt{2}], \quad (14)$$

Весовая импульсная функция соответственно для данного случая, примет вид:

$$W(t) = (2 / N_0) \sqrt{\Omega_c \sqrt{2}} e^{-\Omega_c t / \sqrt{2}} \sin \Omega_c t / \sqrt{2}; \quad t \geq 0.$$

Выражения (13) и (14) описывают так называемую баттервортовскую модель однократно дифференцируемого в среднем квадратическом случайного процесса.

Частный вариант 2:  $a_1^2 - 4a_0 = 4\Omega_c^2(\xi^2 - 1) = 0$ . Из этого уравнения находим  $\xi = 1$ ;  $\beta = \Omega_c \xi = \Omega_c$ . Спектральная плотность и нормированная корреляционная функция принимают вид соответственно:

$$S_\lambda(\omega) = 8\Omega_c^3 / [\omega^2 + \Omega_c^2]^2; \quad \omega \geq 0;$$

$$r_\lambda(\tau) \approx \exp(-\Omega_c |\tau|) \cdot (1 + \Omega_c |\tau|).$$

Отсюда видно, что процесс  $\Lambda(t)$  однократно дифференцируем в среднем квадратическом. Весовая импульсная функция принимает вид:

$$W(t) = (2 / N_0) \Omega_c \sqrt{\beta} t e^{-\beta t}; \quad t \geq 0.$$

Пример 3. Рассмотрим уравнение (3) при  $k = \infty$ . В этом случае в зависимости от значений его коэффициентов можно получить описание ряда идеализированных систем и соответствующих им процессов на выходе при подаче на вход белого шума (идеальный гауссов фильтр, идеальный фильтр Баттерворта). Этому фильтру присущи следующие передаточная и импульсная весовая функции (при  $\sigma_\lambda^2 = 1$ ):

$$W(j\omega) = \begin{cases} \sqrt{\pi / \Omega_c} / N_0, & |\omega| \leq \Omega_c; \\ 0, & |\omega| > \Omega_c; \end{cases}$$

$$W(t) = \sqrt{\Omega_c \setminus \pi} \cdot \sin \Omega_c t / (N_0 \Omega_c t); \quad -\infty < t < +\infty.$$

Спектральная плотность и корреляционная функция процесса  $\Lambda(t)$  на выходе описываются выражениями (15) и (16):

$$S_\lambda(\omega) = \begin{cases} 2\pi / \Omega_c, & 0 \leq \omega \leq \Omega_c; \\ 0, & \omega > \Omega_c; \end{cases} \quad (15)$$

$$r_\lambda(\tau) = \sin \Omega_c \tau / (\Omega_c \tau); \quad \sigma_\lambda^2 = 1. \quad (16)$$

Из сказанного видно, что работа широкого класса динамических систем в стационарном режиме при воздействии широкополосного случайного возмущения, в качестве модели которого по отношению к заданной системе может быть принят белый шум, может описываться линейным дифференциальным уравнением Баттерворта:

$$\Lambda^{(k)}(t) + a_{k-1} \Omega_c \Lambda^{(k-1)}(t) + a_{k-2} \Omega_c^2 \Lambda^{(k-2)}(t) + \dots + a_0 \Omega_c^k \Lambda(t) = X(t), \quad (17)$$

где  $\Omega_c$  — ширина (на уровне 0,5) спектра выходного процесса  $\Lambda(t)$ , которая для баттервортовского процесса совпадает с резонансной частотой системы.

Выражение для спектральной плотности мощности  $S_\lambda(\omega)$ , для уравнения (17) нормированное (при любом  $k$ ) к единичной дисперсии выходного процесса  $\Lambda(t)$ , имеет вид полинома Баттерворта:

$$S_\lambda(\omega) = \mu(k) / [1 + (\omega_c / \Omega_c)^{2k}]; \quad k = 1, 2, \dots, \infty, \quad (18)$$

где  $\mu(k) = (4k / \Omega_c) \sin[\pi / (2k)]$ , и соответствует стационарному  $(k-1)$  раз дифференцируемому (в среднем квадратическом) случайному процессу. В частности, при  $k=1$  и  $k=2$  получаем (5) и (13) соответственно, а при  $k=\infty$  (18) характеризует процесс с ограниченным прямоугольным спектром вида (15).

Обратное преобразование Фурье для (18) дает нормированную корреляционную функцию процесса Баттерворта в виде ряда:

$$r_\lambda(\tau) = \sin \pi / (2k) \sum \left[ (-1)^i \frac{\sin \frac{(i+1)\pi}{2}}{\sin \frac{(i+1)\pi}{2k}} \cdot \frac{(\Omega_c |\tau|)^i}{i!} \right]. \quad (19)$$

В частности, для  $k=1$  и  $k=2$  выражения  $r_\lambda(\tau)$  получены в примерах 1 и 2 в явном виде, формулы (6) и (14).

В таблице 1 приведены характеристики моделей недифференцируемого, однократно и бесконечно дифференцируемого процессов, полученные на основании формул (17) - (19).

Таблица 1. Характеристики моделей различных процессов

Процесс	$k$	$r_\lambda(\tau)$	$S_\lambda(\omega), \omega \geq 0$	Разложение $r_\lambda(\tau)$ в ряд Тэйлора
Не дифф.	1	$e^{-\Omega_c \tau }$	$(4/\Omega_c)/[1+(\omega/\Omega_c)^2]$	$1 - \Omega_c \tau  + \frac{\Omega_c\tau^2}{2!} - \frac{(\Omega_c \tau )^3}{3!} + \dots$
Одн. дифф.	2	$e^{\frac{-\Omega_c \tau }{\sqrt{2}}} \left( \cos \frac{\Omega_c\tau}{\sqrt{2}} + \sin \frac{\Omega_c \tau }{\sqrt{2}} \right)$	$\frac{4\sqrt{2}/\Omega_c}{1+(\omega/\Omega_c)^4}$	$1 - \frac{(\Omega_c\tau)^2}{2} + \frac{\sqrt{2}\Omega_c^3 \tau ^3}{6} - \dots$
Беск. дифф.	$\infty$	$\frac{\sin \Omega_c\tau}{\Omega_c\tau}$	$\begin{cases} 2\pi/\Omega_c; & \omega \leq \Omega_c \\ 0; & \omega > \Omega_c \end{cases}$	$1 - \frac{(\Omega_c\tau)^2}{3!} + \frac{(\Omega_c\tau)^4}{5!} - \dots$

В дальнейшем для упрощения вычислений в ряде случаев, в качестве модели однократно дифференцируемого процесса вместо модели 2 (табл. 1) будет использоваться близкий к ней процесс (модель 2а) с характеристиками:

$$r_\lambda(\tau) = (1 + \Omega_c|\tau|)e^{-\Omega_c|\tau|} \approx 1 - \frac{\Omega_c^2\tau^2}{2} + \frac{\Omega_c^3|\tau|^3}{3} - \dots;$$

$$S_\lambda(\omega) = (8/\Omega_c)/[1+(\omega/\Omega_c)^2]^2.$$

**Модели нестационарных измерительных процессов.** Исходя из общей теории линейных преобразований случайных функций, можно указать три возможных случая наблюдения нестационарного процесса на выходе динамической системы [16]: на входе системы с постоянными параметрами действует нестационарный процесс; на вход системы с постоянными параметрами воздействует стационарный процесс, но выходной процесс наблюдается в переходном режиме работы системы; при любом входном процессе динамическая система имеет переменные во времени параметры.

Очевидно, что наиболее существенная нестационарность выходного процесса в первом случае будет иметь место при воздействии на вход системы наиболее динамичного из возможных нестационарных возмущений, что позволяет на практике ограничиться рассмотрением входных возмущений типа  $\delta$  функции  $\delta(t)$  и единичного (например, положительного) скачка  $I(t)$ .

Переходный процесс во втором случае представляет собой только собственные колебания системы, в отличие от первого случая, где переходный процесс содержит наряду с собственными также вынужденные колебания за счет действия нестационарного входного возбуждения.

Таким образом, анализ первого и второго случаев позволяет выбрать в качестве одной из моделей нестационарного процесса отклики различных динамических систем на входные возмущения типа  $\delta(t)$  и  $I(t)$ .

В таблице 2 приведены отклики линейных динамических систем, описываемых уравнениями Баттерворта (17) порядков  $k=1, 2; \infty$ , на возмущения типа  $\delta(t)$  и  $I(t)$  на входе. Эти отклики используются в последующих расчетах в качестве моделей переходных нестационарных процессов.



Таблица 2. Отклик системы на входное воздействие

$k$	$X(t) = b_0 \cdot 1(t)$	$b_0 \cdot \delta(t)$
1	$\sqrt{\frac{2}{\Omega_c}}(1 - e^{-\Omega_c t}); t \geq 0$	$\sqrt{2\Omega_c} e^{-\Omega_c t}; t \geq 0$
2	$\frac{\sqrt{2\sqrt{2}}}{\sqrt{\Omega_c}} \left\{ 1 - e^{\frac{-\Omega_c t}{\sqrt{2}}} \left[ \sin\left(\frac{\Omega_c t}{\sqrt{2}}\right) + \cos\left(\frac{\Omega_c t}{\sqrt{2}}\right) \right] \right\}; t \geq 0$	$2\sqrt{\Omega_c} \sqrt{2} e^{\frac{-\Omega_c t}{\sqrt{2}}} \sin \frac{-\Omega_c t}{\sqrt{2}}; t \geq 0$
$\infty$	$2\sqrt{\frac{\pi}{\Omega_c}} \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \left[ \Omega_c t - \frac{(\Omega_c t)^3}{3 \cdot 3!} + \frac{(\Omega_c t)^5}{5 \cdot 5!} - \dots \right] \right\}; t \geq 0$	$\sqrt{\frac{\Omega_c}{\pi}} \cdot \frac{\sin \Omega_c t}{\Omega_c t}; -\infty < t < +\infty$

Аналитическое соотнесение по третьему случаю характера нестационарности выходного сигнала с изменением параметров системы, является более сложной задачей, для решения которой могут быть использованы методы теории чувствительности [17]. Считаем, что параметры системы изменяются скачком в некоторые произвольные моменты времени (например, под влиянием потока отказов в элементах и узлах системы), а в промежутке между этими моментами сохраняются неизменными. Полагаем, что переходный процесс после скачка отсутствует, ибо нестационарность, вызванная такими скачками, в принципе не отличается от нестационарности, вызванной  $\delta$ -функциями или скачками на входе, а ее, в свою очередь, мы отнесли к отдельному случаю (первому).

Будем считать, как и выше, что динамическая система представляет собой фильтр Баттерворта произвольного порядка, вид и степень дифференциального уравнения при этом определены однозначно (17). В этом случае  $\Omega_c$  определяет широкополосность выходного случайного процесса. Важными изменениями параметров динамической системы при описании ее уравнением (17) являются: изменения порядка полинома Баттерворта (т. е. изменения степени дифференциального уравнения); изменения широкополосности системы  $\Omega_c$  и значений коэффициентов (т. е. изменения инерционных свойств и режима работы системы).

Согласно (18) и (19), эти изменения, будут приводить прежде всего к изменению вида  $S_\lambda(\omega)$ , а следовательно, и вида корреляционной функции  $R_\lambda(\tau)$  выходного процесса, который таким образом становится нестационарным, а также к изменению широкополосности  $\Omega_c$  этого процесса. На этом основании в качестве второй модели нестационарного процесса примем процесс, описываемый (17) - (19), где  $k$  и  $\Omega_c$  являются некоррелированными случайными величинами, каждая из которых принимает ряд дискретных значений в случайные моменты времени, а в промежутках сохраняет фиксированное значение.

**Показатели погрешности при измерениях и передаче.** Показатель равномерного приближения, в качестве которого используется максимальное абсолютное значение погрешности на интервале наблюдения  $T$  или в точке по множеству реализаций, математически записывается следующим образом:

$$\varepsilon_{\max} = \max_i \max_{t \in T} |\varepsilon_i(t)| = \max_{t \in T} |E(t)|,$$

или 
$$\varepsilon_{\max}(t_k) = \max_i |\varepsilon_i(t_k)|,$$

где  $i$  - номер реализации;  $k = 0, 1, 2, \dots$ ;  $\varepsilon_i = \lambda_i(t) - \lambda_i^*(t)$ .

Показатель среднего квадратического приближения:

$$\eta_\varepsilon^2 = \overline{\eta_\varepsilon^2(t)} = (1/T) \int_0^T m[|\Lambda(t) - \Lambda^*(t)|^2] dt.$$

Дисперсия погрешности, приведенная к средней мощности стационарного сообщения с нулевым средним, будет определяться выражением [6]:

$$\delta^2 = \frac{\eta_\varepsilon^2}{m[\lambda^2(t)]} = \frac{(1/T) \int_0^T m[|\lambda(t) - \lambda^*(t)|^2] dt}{m[\lambda^2(t)]}.$$

В качестве показателя достоверности используем вероятность появления аномальных ошибок за определенное время или на один отсчет сообщения, определяемая выражением  $P_{ан} = P(|\varepsilon| \geq \varepsilon_{ан})$ , т.е. вероятность того, что текущая погрешность  $|\varepsilon(t)|$  превысит некоторое, наперед заданное значение  $\varepsilon_{ан}$ , начиная с которого погрешность считается аномальной.

Таким образом, качество передачи и измерений целесообразно оценивать по величине нормальной приведенной средней квадратической погрешности  $\delta_n$  (показатель точности) и величине вероятности появления аномальных ошибок  $P_{ан}$  (показатель достоверности). В некоторых случаях аномальные ошибки могут также характеризоваться квадратом средней квадратической погрешности.

**Выводы.** В статье показан общий подход к описанию моделей измерительных сообщений на выходе исследуемого объекта, в частности, на выходе линейной динамической системы, на вход которой подается белый шум  $N(t)$ . Рекомендовано в этом случае воспользоваться описанием процесса на основе стохастического дифференциального уравнения (1). Установлена возможность преобразования дифференциального уравнения  $k$ -го порядка, в векторное  $k$ -мерное дифференциальное уравнение первого порядка. Случайный процесс, описываемый линейным дифференциальным уравнением  $k$ -го порядка или задан дробно-рациональной спектральной плотностью  $S_\lambda(\omega)$ , может быть представлен в виде отдельной компоненты или линейной комбинации нескольких компонент векторного марковского процесса.

Показаны некоторые модели случайных процессов, анализ которых показал, что работа широкого класса динамических систем в стационарном режиме при воздействии широкополосного случайного возмущения, может описываться линейным дифференциальным уравнением Баттерворта. Полученные выражения (17) - (19) можно использовать для описания широкого класса моделей стационарных случайных процессов (сообщений).

Рассмотрены модели нестационарных измерительных процессов. Предложено, три возможных случая наблюдения нестационарного процесса на выходе динамической системы.

Анализ первого и второго случаев позволяет выбрать в качестве одной из моделей нестационарного процесса отклики динамических систем на входные возмущения вида  $\delta(t)$  и  $I(t)$ . Третий случай, самый сложный. Важными изменениями параметров динамической системы при описании ее уравнением (17) являются: изменения порядка полинома Баттерворта (т. е. изменения степени дифференциального уравнения); изменения широкополосности системы  $\Omega_c$  и значений коэффициентов (т.е. изменения инерционных свойств и режима работы системы). Согласно (18) и (19), эти изменения, будут приводить прежде всего к изменению вида  $S_\lambda(\omega)$ , а следовательно, и вида корреляционной функции  $R_\lambda(\tau)$  выходного процесса, который таким образом становится нестационарным, а также к изменению широкополосности  $\Omega_c$  этого процесса. На этом основании в качестве второй модели нестационарного процесса примем процесс, описываемый (17) - (19), где  $k$  и  $\Omega_c$  являются некоррелированными случайными величинами, каждая из которых принимает ряд дискретных значений в случайные моменты времени, а в промежутках сохраняет фиксированное значение.

Рассмотрены показатели погрешности при измерениях и передаче. Предложены показатели равномерного приближения и среднего квадратического приближения. Показано, что качество передачи и измерений целесообразно оценивать по величине нормальной приведенной средней квадратической погрешности  $\delta_n$  (показатель точности) и величине вероятности появления аномальных ошибок  $P_{ан}$  (показатель достоверности).

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Третьяков, И. А. Оценка рисков автоматизированной информационной системы посредством модели информационных потоков / И. А. Третьяков // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2022. – № 2. – С. 31-41. – EDN SOGFUA.
2. Третьяков, И. А. Элементы автоматизированных систем измерения параметров поверхностных акустических волн посредством методов оптического зондирования / И. А. Третьяков, В. В. Данилов // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2022. – № 3. – С. 46-51. – EDN CONAZX.
3. Аprobация автоматизированной системы непрерывного мониторинга объекта / И. А. Третьяков, В. Ю. Подлесный, В. И. Тимченко, В. В. Данилов // Донецкие чтения 2023: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности: Материалы VIII Международной научной конференции (Донецк, 25–27 октября 2023 г.). – Том 2: Физические, технические и компьютерные науки / под общей редакцией проф. С.В. Беспаловой. – Донецк: Изд-во ДонГУ, 2023. – С. 236-239. – EDN HVJWVD.
4. Третьяков, И. А. Применение оптических методов обработки информации в АСНИ радиосигналов / И. А. Третьяков, В. В. Данилов, В. А. Ступак // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2024. – № 1. – С. 42-49. – DOI 10.5281/zenodo.10974622. – EDN LSKSPA.
5. Цифровые информационно-измерительные системы: Теория и практика / А. Ф. Фомин, О. Н. Новоселов, К. А. Победоносцев, Ю. Н. Чернышов. – М.: Энергоатомиздат, 1996. – 445 с.
6. Суругина, В. А. Информационно-измерительная техника и электроника / В. А. Суругина, В. И. Калашников, Г. Г. Раннев. – М.: Высшая школа, 2006. – 512 с.
7. Цапенко, М. П. Измерительные информационные системы / М. П. Цапенко. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 440 с.
8. Гаранин, М. В. Системы и сети передачи информации / М. В. Гаранин, В. И. Журавлев, С. В. Кунегин – М.: Радио и связь, 2001. – 336 с.
9. Раннев, Г. Г. Измерительные информационные системы / Г. Г. Раннев. – М.: Академия, 2010. – 329 с.
10. Яновский, А. В. Структуры автоматизированных систем научных исследований параметров поверхностных акустических волн / А. В. Яновский, И. А. Третьяков, В. В. Данилов // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2021. – № 4. – С. 46-53. – EDN FOBKIO.
11. Рубичев, Н. А. Измерительные информационные системы / Н. А. Рубичев. – М.: Дрофа, 2010. – 336 с.

12. Новопашенный, Г. Н. Информационно-измерительные системы. / Г. Н. Новопашенный. – М.: Высшая школа, 1977. – 208 с.
13. Третьяков, И. А. Выбор критерия подобия скрытых марковских моделей в АСНИ / И. А. Третьяков // Донецкие чтения 2023: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности: Материалы VIII Международной научной конференции (Донецк, 25–27 октября 2023 г.). – Том 2: Физические, технические и компьютерные науки / под общей редакцией проф. С.В. Беспаловой. – Донецк: Изд-во ДонГУ, 2023. – С. 233-236. – EDN HDIKPH.
14. Вычислительная математика и информационные технологии / И. П. Болодурин, Л. М. Анциферова, Д. И. Парфенов, Л. С. Гришина. – Оренбург: ОГУ, 2021. – 132 с.
15. Теория передачи сигналов / А. Г. Зюко, Д. Д. Кловский, М. В. Назаров, Л. М. Финк. – М.: Связь, 1980. – 304 с.
16. Основы теории случайных процессов для радиофизиков: учебно-методические материалы для магистров и аспирантов / А. А. Мальцев, И. В. Артюхин, О. В. Болховская [и др.]. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2014. – 78 с.
17. Томович, Р. Общая теория чувствительности / Р. Томович, М. Вукобратович. – М.: Советское радио, 1972. – 240 с.

*Поступила в редакцию 15.06.2024 г., рекомендована к печати 28.06.2024 г.*

## FUNDAMENTALS OF INFORMATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGIES IN ACS AND ASRS

*Podlesnyi V.IU., Danilov V.V., Tretiakov I.A., Kolesnik E.V.*

In this paper, the information characteristics of measurement messages are considered, in particular, models of measurement messages, models of stationary random processes, models of non-stationary processes (measuring), errors in their measurement and transmission.

**Keywords:** ACS, ASRS, information support, measurement messages, information characteristics.

### **Подлесный Владимир Юрьевич**

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

### **Podlesnyi Vladimir IUrevich**

Postgraduate student at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

### **Данилов Владимир Васильевич**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиофизики 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.

### **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.

### **Колесник Екатерина Витальевна**

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

### **Kolesnik Ekaterina Vitalevna**

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

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА КЛЮЧЕВЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО СЕКТОРА ПРИ ПОМОЩИ ЯЗЫКА PYTHON

© 2024 Пономарёв Д.С., Горохов М.М.

---

В статье рассмотрена разработка одной из важных составляющих информационных систем: инструментов проведения сравнительного анализа основных статистических метрик ключевых параметров эффективности производственного сектора. Для реализации поставленной задачи был использован язык Python. Разработка данного инструмента велась на примере производственного сектора пенитенциарной системы. Рассмотрена работа с данными. Приведены схемы использования хранилища данных, баз данных, а также категориальных фильтров и формирования выборок для сравнения. Приведен алгоритм для разработки рассматриваемого инструмента. Приведены примеры использования библиотек для обработки данных, а также для создания внешних пользовательских интерфейсов.

**Ключевые слова:** алгоритм, обработка данных, Python, статистические метрики, системный анализ, информационная система, ключевые параметры эффективности, пенитенциарная система, производственный сектор.

---

**Введение.** На сегодняшний день разработка информационных систем для анализа и планирования деятельности предприятий – является неотъемлемой частью практически любого производства. Оценка статистических метрик ключевых параметров эффективности (далее – KPI) [1], является одной из важных составляющей любой информационной системы. В данной работе рассмотрим разработку пользовательских интерфейсов, а также подходы для расчета и визуализации основных статистических метрик для KPI на примере производственного сектора пенитенциарной системы. Данный выбор был сделан не случайно: ежегодный объем производства, согласно официальным открытым источникам, составляет 43,2 млрд рублей [2]. Кроме того, на сегодняшний день наблюдается активная разработка специализированного программного обеспечения и проведение научных исследований для пенитенциарной системы [3]. Поэтому, разработка информационных систем и составных их частей на примере производственного сектора пенитенциарной системы, не только является хорошим примером, но и может быть перенята для других производств. В качестве инструмента для реализации поставленных задач был выбран язык программирования Python. Согласно индексу TIOBE [4] – данный язык на сегодняшний день признан одним из самых популярных в мире. Кроме того, выбор данного языка обоснован наличием огромного количества библиотек для анализа данных и машинного обучения [5, 6], разработки приложений, автоматизации рутинных задач, а также возможностью работы с базами данных.

**Формирование выборок для сравнительного анализа статистических метрик.** Для того чтоб оценить результаты производственной деятельности за текущий год – часто прибегают к сравнению с предыдущими периодами. Рассмотрим случай, когда можно разработать инструменты, благодаря которым возможно сравнить статистические метрики KPI для текущего года (или, например, последних нескольких лет (обозначим данную выборку далее как *df\_selection*)) относительно других периодов (обозначим далее – *df\_selection\_exp*). Для этого можно воспользоваться фильтрами данных.

На рисунке 1 представлена обобщенная схема формирования выборок для рассматриваемого и сравнительного периода, а также использование категориальных фильтров данных на примере пенитенциарного производственного сектора.

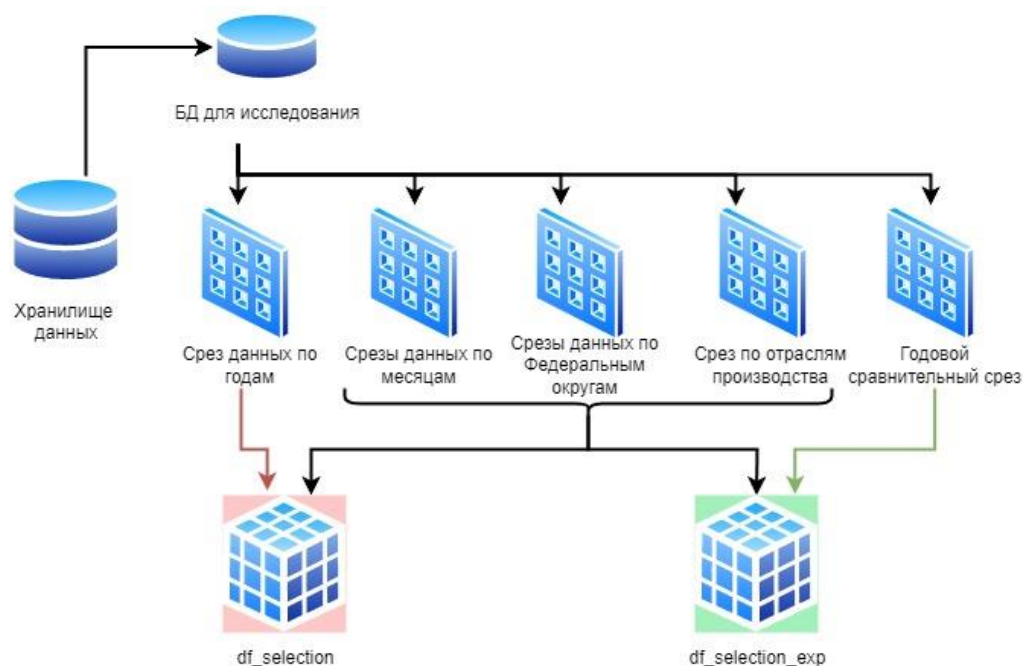


Рис.1. Обобщенная схема получения выборок для проведения сравнительного анализа

В данном случае, все данные содержатся в хранилище данных [7-9], из которого мы выгружаем и формируем базу данных (далее – БД) для проведения исследования. Далее, мы задаем интересующие категории в фильтрах (исследовать определенную отрасль производства или несколько отраслей, федеральный округ в котором развита данная отрасль производства, срезы данных по месяцам), а также задаем годовые периоды, которые нас интересуют (т.е. *df\_selection*) и те, относительно которых следует проводить исследование (т.е. *df\_selection\_exp*). Например, возможно сравнить текущий год относительно прошлого или текущий год относительно нескольких предыдущих и т.д.). Таким образом, мы сможем выстроить и отследить динамику улучшения или ухудшения метрик КРІ для производства.

Непосредственно работу самих фильтров данных следует рассмотреть в отдельной статье. В нашем же случае – рассмотрим, как будет происходить и организовываться сравнение статистических метрик КРІ.

В качестве КРІ были выбраны: объемы производства, количество и стоимость арендованного оборудования, стоимость аренды площадей, остатки продукции с прошлого отчетного периода, доля бракованной продукции, доходы, расходы, чистая прибыль, сумма контрактов на изготовление продукции, среднесписочная численность трудоустроенных, среднеемесячное количество отработанных человеко-часов при сдельной оплате труда, уровень среднеемесячной заработной платы. В качестве возможных срезов данных были рассмотрены отрасли производств, федеральные округа, а также отчетные периоды (в нашем случае месяцы и годы).

**Методы и подходы для расчета статистических метрик.** Рассмотрим создание статистических метрик с учетом заданных срезов данных. Основные статистические метрики, такие как сумма, среднее, медиана, максимум, минимум, стандартное отклонение и дисперсия, рассчитываются из *df\_selection* и *df\_selection\_exp*.

Метрики вычисляются с использованием методов pandas [10]: «*sum()*» для суммы, «*mean()*» для среднего; «*median()*» для медианы; «*max()*» для максимума; «*min()*» для минимума; «*std()*» для стандартного отклонения; «*var()*» для дисперсии; «*quantile([0.05, 0.25, 0.5, 0.75, 0.95])*» для квантилей. Подробное использование данных методов для данных статистических отчетных форм пенитенциарной системы было рассмотрено в работах, посвященных разведочному анализу данных (exploratory data analysis (EDA)) [11]. В приведенной же работе рассматривается разработка самих инструментов для проведения сравнительного анализа данных (который также частично включает подходы EDA) и внедрение их в информационные системы.

Рассмотрим реализацию приведенных методов статистической обработки данных более подробно с учетом возможной реализации срезов данных [12].

Пусть  $M$  — множество выбранных месяцев, а  $m$  – отдельный месяц, тогда (1):

$$M = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}, \quad (1)$$

так как в работе рассматривается весь год (все 12 месяцев), то  $k_{max}=12$ .

Далее рассмотрим учет данных по годам, пусть  $Y$  – множество годов в исследуемой выборке, где  $y$  – отдельный год (2):

$$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_l\}, \quad (2)$$

так как учет данных, согласно отчетным статистическим формам пенитенциарной системы, велся с 2014 года, то  $l=1$  будет характеризовать годовой срез данных 2014 года [13] и далее соответственно по возрастанию.

Аналогичным образом рассмотрим возможность организовать срезы данных по отраслям производства, пусть  $P$  – множество выбранных отраслей производства, а  $p$  – отдельная отрасль производства, тогда (3):

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}, \quad (3)$$

для пенитенциарной системы, согласно отчетным статистическим формам, учет данных ведется по 11 отраслям, также ведется учет общего и отдельно выделено обслуживание котельной, т.е.  $m_{max}=13$ , более точное присвоение индексов для каждой отдельной отрасли производства (а также параметров) рассмотрено в отдельной работе [13].

$F$  – множество для выбранных территорий, на которых располагаются производства (4):

$$F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}, \quad (4)$$

так как в нашем случае рассмотрены масштабы в рамках федеральных округов, то  $f_{max}=8$ .

Пусть  $X$  характеризует один из рассматриваемых KPI и представляет собой многомерный массив (тензор), элементы которого  $X_{m,y,p,f}$  содержат значения параметра  $X$  для каждой комбинации месяцев, годов, отраслей и территорий. Тогда, применение метода «*sum()*» по выбранным категориям может быть записано как (5):

$$\sum_{(m,y,p,f) \in M \times Y \times P \times F} X_{m,y,p,f} \cdot \quad (5)$$

Если представить  $X$  как вектор, упорядоченный по всем возможным значениям  $m$ ,  $y$ ,  $p$  и  $f$ , то можно записать (6):

$$X = (X_{m_1, y_1, p_1, f_1}, X_{m_2, y_2, p_2, f_2}, \dots, X_{m_{12}, y_n, p_{13}, f_8}), \quad (6)$$

пусть  $1$  обозначает вектор, состоящий из единиц, размерности  $k \times l \times m \times n$ , соответствующей количеству элементов в выбранных множествах  $M$ ,  $Y$ ,  $P$  и  $F$ . Тогда сумма всех элементов  $X$  по выбранным категориям (7):

$$Sum(X) = 1^T X. \quad (7)$$

Таким образом, формула суммы параметра (8):

$$Sum(X) = \sum_{(m,y,p,f) \in M \times Y \times P \times F} X_{m,y,p,f} = 1^T X. \quad (8)$$

Аналогичным образом были разработаны и остальные статистические метрики с учетом категориальных фильтров данных. Рассмотрим далее наиболее значимые из них.

Для расчета среднего арифметического, (по аналогии с (1-8)) обозначим количество элементов в произведении множеств  $M \times Y \times P \times F$  как  $N = |M| \times |Y| \times |P| \times |F|$ , тогда (9):

$$Mean(X) = \frac{1}{n} \sum_{(m,y,p,f) \in M \times Y \times P \times F} X_{m,y,p,f} = \frac{1^T X}{N}. \quad (9)$$

Для нахождения медианы необходимо упорядочить значения  $X$  по возрастанию. Обозначим этот упорядоченный вектор как  $X_{sorted}$ . Тогда медиана  $Median(X)$  будет (10):

$$Median(X) = \begin{cases} X_{sorted, \frac{N+1}{2}} \text{ при } N_{\text{нечётное}} \\ \frac{X_{sorted, \frac{N}{2}} + X_{sorted, \frac{N}{2}+1}}{2} \text{ при } N_{\text{чётное}} \end{cases}. \quad (10)$$

Для расчета дисперсии и стандартного отклонения (11, 12):

$$Variance(X) = \frac{1}{n} \sum_{(m,y,p,f) \in M \times Y \times P \times F} (X_{m,y,p,f} - Mean(X))^2, \quad (11)$$

$$StdDev(X) = \sqrt{Variance(X)}. \quad (12)$$

Далее рассмотрим при помощи языка Python расчет представленных статистических метрик с учетом применения и создания внешних пользовательских интерфейсов в информационных системах для них.

**Алгоритмы расчета и визуализации.** Непосредственно расчет статистических метрик проводился при помощи библиотеки Pandas (подключение библиотеки выполнялось как «`import pandas as pd`»). На примере средних значений параметра «Объем производства», расчет будет выглядеть как:

```
mean = float(pd.Series(df_selection['Объем_производства']).mean())
```

где переменная «`mean`» в данном случае является средним арифметическим для значений отфильтрованных данных параметра «Объем\_производства» (т.е. из «`df_selection`»).

Аналогичным образом проводится расчет и для выборки относительно которой проводится сравнительный анализ (т.е. для «`df_selection_exp`»):

```
mean_exp = float(pd.Series(df_selection_exp['Объем_производства']).mean())
```

Подобные операции выполняются и для других статистических метрик KPI.



Далее рассмотрим создание визуализации для данных метрик в информационной системе на основе библиотеки *streamlit* [14] (подключение библиотеки выполнялось как «*import streamlit as st*»).

Визуализация выборки после фильтров была реализована следующим образом (рисунок 2).

```
def Manufacturing():
    with st.expander("☑Скрыть столбцы"):
        showData = st.multiselect('Скрыть столбцы: ', df_selection.columns,
                                  default=["Федеральный_округ", "Отрасль", "Год", "Месяц", "Объем_производства",
                                           "Оборудование", "Аренда", "Остатки_продукции", "Брак", "Чистая_прибыль",
                                           "Сумма_контрактов"])
        st.dataframe(df_selection[showData], use_container_width=True)
```

Рис. 2. Разработка поля для визуализации полученной основной выборки после прохождения категориальных фильтров

Рассмотрим данный этап более подробно. Визуализация выборки была записана в функцию «*Manufacturing*». Используется метод «*expander*», чтобы дать пользователю возможность выбрать, какие столбцы из *df\_selection* он будет использовать. Переменная «*showData*» представляет списки столбцов, выбранных пользователем с помощью виджета «*multiselect*». Выражение «*st.dataframe(df\_selection[showData], use\_container\_width=True)*» – позволяет отображать данные, содержащие только выбранные пользователем колонки.

В результате, было получено следующее окно и интерфейсы (рисунок 3), которые содержат инструменты для визуализации выборки после фильтров, а также возможность выбрать параметры, относительно которых будет проводиться исследование.

	Федеральный_округ	Отрасль	Год	Месяц	Объем_производства	Оборудование	Аренда
0	Северо-Западный	Общее	2021 год	декабрь	3,384,320.07	129	1,147.76
1	Северо-Западный	Химическая	2021 год	декабрь	435.28	0	0
2	Северо-Западный	Лесная	2021 год	декабрь	890,485.37	42	387
3	Северо-Западный	Лесная (Деревообраба	2021 год	декабрь	647,828.06	42	387

Рис. 3. Добавление и визуализация выборки в аналитической системе после категориальных фильтров согласно представленным методам

Рассмотрим создание виджетов для основных статистических метрик KPI, согласно приведенным ранее формулам (1-12). Методы библиотеки *Streamlit* – «*st.header*» и «*st.write*» используются для добавления заголовка и описания секции, «*st.columns*» создает колонки для отображения метрик (т.е. разметку основного поля информационной системы по колонкам).

Внутри каждой колонки используется метод «*st.metric*», позволяющий визуализировать расчет каждой рассчитываемой метрики. Рассмотрим аргументы данного метода, которые были применены: «*label*» - отображает название метрики, «*value*» - непосредственно значение метрики (которое приравнивается, например, рассчитанной ранее переменной «*sum\_manufacturing*», для этого были использованы f-строки). Аргументы «*delta*» (значение для сравниваемой метрики) и «*delta\_color*» (цвет метрики в зависимости от сравнения – серый, зеленый или красный (алгоритм будет рассмотрен далее более подробно)) используются для отображения изменений: сравнение данных из отфильтрованных ранее выборок *df\_selection\_exp* и *df\_selection*.

Для сравнения были выбраны значения не всех статистических метрик из отфильтрованных данных: суммы (8) – «*sum\_exp*», среднего арифметического (9) «*mean\_exp*», медианы (10) «*median\_exp*». Остальные метрики также рассматривались, но сравнение при помощи аргументов метода «*st.metric*» – «*delta*», «*delta\_color*» для них не проводились (так как в итоге информационное поле становилось слишком перегруженным значениями, которые в итоге на практике оказываются редко востребованными). Упрощенная версия алгоритма для записи данных с использованием приведенных подходов в «*st.metric*» на примере расчета среднего арифметического представлена на рисунке 4.

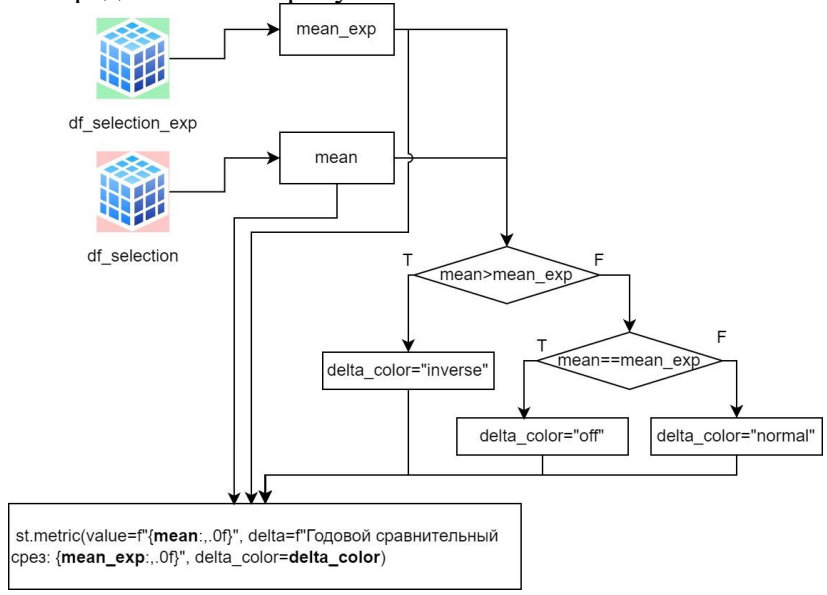


Рис. 4. Алгоритм визуализации статистических метрик для сравнения срезов данных по годам (на примере средних значений)

Аналогичным образом была проведена разработка визуализации и для остальных статистических метрик KPI. В результате, для статистических метрик в информационную систему были добавлены поля (рисунок 5, на примере параметра «Объем производства»).

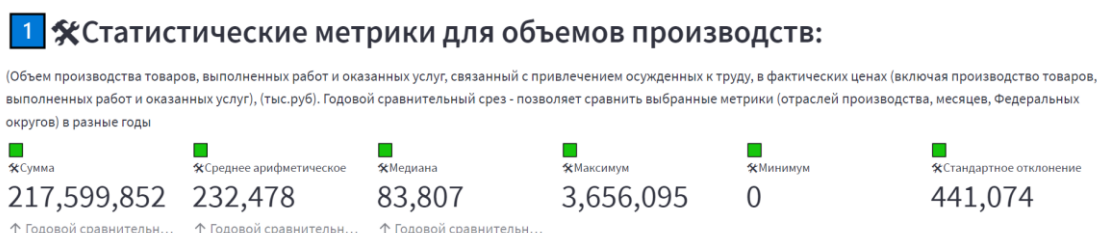


Рис. 5. Визуализация основных статистических метрик KPI

Если статистические метрики в заданных срезах данных для выборки *df\_selection\_exp* превышают *df\_selection*, то подписи дополнительных данных выделяются зеленым цветом, а если наоборот, то красным (реализованная визуализация представлена на рисунке 6, на примере параметра «Численность трудоустроенных»).

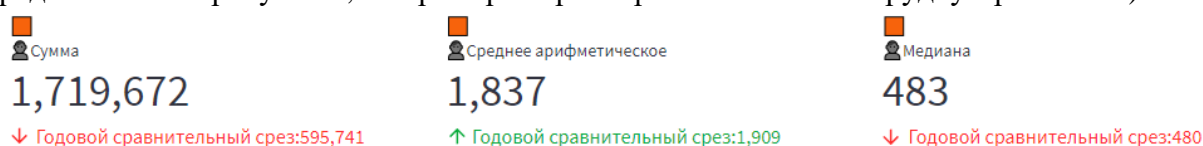


Рис. 6. Разработка визуализации сравнения выборок *df\_selection\_exp* и *df\_selection*

Таким образом, обеспечивается интерактивный анализ производственных данных, предоставляя пользователю возможность выбора данных для отображения и предоставляя основные статистические метрики для анализа.

**Заключение.** В работе рассмотрено создание статистических метрик, которые позволяют провести сравнительный анализ КРІ в заданных срезах данных. Рассмотрена реализация срезов данных с позиций реляционной теории. Установлено, что использование рассмотренных библиотек языка Python позволяют быстро и эффективно провести разработку данных метрик: провести расчет возможно при помощи методов библиотеки Pandas, а визуализацию и внедрение в информационную систему можно реализовать при помощи библиотеки Streamlit. Рассмотренные разработки велись на примере производственного сектора пенитенциарной системы, однако, приведенные подходы и алгоритмы могут быть использованы и для других производств.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Marr, V. Key Performance Indicators (KPI): The 75 measures every manager needs to know / V. Marr. – Financial Times Press, 2012. – 347 p.
2. Управление организации производственной деятельности и трудовой адаптации осужденных [Электронный ресурс] / Официальный сайт ФСИН России [Сайт] – URL: <https://fsin.gov.ru/structure/adaptation/> (дата обращения 03.05.2024).
3. Щербаков, Г. В. Современное состояние научной и научно-технической деятельности в уголовно-исполнительной системе Российской Федерации / Г. В. Щербаков, Д. Г. Зыбин // Ведомости уголовно-исполнительной системы. – 2024. – № 2(261). – С. 7-10. – EDN UNQRZV.
4. ТЮБЕ Index [Электронный ресурс] / ТЮБЕ [Сайт]. – URL: <https://www.tiobe.com/tiobe-index/> (дата обращения 03.05.2024).
5. Перевышин, В. Г. Повышение точности работы нейронных сетей по распознаванию рукописных символов за счет предварительной подготовки данных / В. Г. Перевышин, Р. В. Ковальчик // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2024. – № 1. – С. 24-31. – DOI 10.5281/zenodo.10974581. – EDN KWDKKN.
6. Харченко, Б. В. Искусственный интеллект как инструмент для работы с текстами / Б. В. Харченко, Е. С. Нестругина // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 4. – С. 29-40. – EDN NTWGBV.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015612855. Стат.Оператор : № 2014663634 : заявл. 26.12.2014 : опубл. 26.02.2015 ; заявитель Федеральное казенное учреждение «Научно-исследовательский институт информационных технологий Федеральной службы исполнения наказаний» (ФКУ НИИИТ ФСИН России). – EDN KHWEMU.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015612075. Стат.Проект : № 2014663715 : заявл. 26.12.2014 : опубл. 11.02.2015 ; заявитель Федеральное казенное учреждение «Научно-исследовательский институт информационных технологий Федеральной службы исполнения наказаний» (ФКУ НИИИТ ФСИН России). – EDN GHRZEY.

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015612427. Стат.Аналитик : № 2014663636 : заявл. 26.12.2014 : опубл. 18.02.2015 ; заявитель Федеральное казенное учреждение «Научно-исследовательский институт информационных технологий Федеральной службы исполнения наказаний» (ФКУ НИИИТ ФСИН России). – EDN WLOOLP.
10. Harrison, M. Effective Pandas: Patterns for Data Manipulation / M. Harrison. – Independently published, 2021. – 497 p.
11. Пономарев, Д. С. Обработка форм статистической отчетности Федеральной службы исполнения наказаний на основе методов разведочного анализа данных библиотек языков "Python" и "R" / Д. С. Пономарев, М. М. Горохов, С. Б. Пономарев // Вестник Воронежского института ФСИН России. – 2023. – № 2. – С. 106-112. – EDN WOSUGG.
12. Date, C. J. SQL and Relational Theory / C. J. Date. – O'Reilly, 2010. – 474 p.
13. Пономарев, Д. С. Разработка систем индексации данных для производственно-экономического и трудового секторов пенитенциарной системы / Д. С. Пономарев // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 3(111). – С. 100-108. – EDN CAZJLC.
14. Khorasani, M. Web Application Development with Streamlit / M. Khorasani, M. Abdou, J. H. Fernandez. – Apress, 2022. – 508 p.

*Поступила в редакцию 28.06.2024 г., рекомендована к печати 05.08.2024 г.*

### **DEVELOPMENT OF SYSTEMS FOR COMPARATIVE ANALYSIS OF KEY PARAMETERS OF THE EFFICIENCY OF THE PRODUCTION SECTOR USING THE PYTHON LANGUAGE**

*Ponomarev D.S., Gorokhov M.M.*

The article discusses the development of one of the important components of information systems: tools for conducting a comparative analysis of the main statistical metrics of key parameters of the efficiency of the manufacturing sector. To implement the task, the Python language was used. The development of this tool was carried out using the example of the production sector of the penitentiary system. Work with data is considered. Schemes for using a data warehouse, databases, as well as categorical filters and generating samples for comparison are given. An algorithm for developing the tool in question is presented. Examples are given of using libraries for data processing, as well as for creating external user interfaces.

**Keywords:** algorithm, data processing, python, statistical metrics, system analysis, information system, key performance parameters, penitentiary system, manufacturing sector.

#### **Пономарёв Дмитрий Сергеевич**

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник филиала (г. Ижевск) ФКУ «Научно-исследовательский институт Федеральной службы исполнения наказаний», доцент кафедры водоснабжения и водоподготовки ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», Российская Федерация, Удмуртская Республика, г. Ижевск.  
E-mail: ponomarev.dmitry1990@mail.ru

#### **Ponomarev Dmitrii Sergeevich**

Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher of the Branch (Izhevsk) of the Federal Penitentiary Service of Russia, Associate Professor of Izhevsk State Technical University, Russian Federation, Udmurt Republic, Izhevsk.

#### **Горохов Максим Михайлович**

доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник филиала (г. Ижевск) ФКУ «Научно-исследовательский институт Федеральной службы исполнения наказаний», заведующий кафедрой информационных систем ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», Российская Федерация, Удмуртская Республика, г. Ижевск.

#### **Gorokhov Maksim Mikhailovich**

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Branch (Izhevsk) of the Federal Penitentiary Service of Russia, Head at the Department of Information Systems of Izhevsk State Technical University, Russian Federation, Udmurt Republic, Izhevsk.

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА НАВИГАЦИИ НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ ЕСТЕСТВЕННОГО ЯЗЫКА

© 2024 Рудак Л.В., Зори С.А.

В статье рассматривается структура и применение интеллектуальной системы навигации на основе обработки естественного языка (NLP). Система предназначена для упрощения навигации и поиска информации в сложных информационных системах. Основное внимание уделено архитектуре системы, включающей модули обработки естественного языка, поиска и извлечения информации, управления знаниями, а также обучения и адаптации. Результаты исследования демонстрируют, что система способна значительно повысить точность и эффективность поиска информации, что делает её полезной для применения в различных областях, таких как научные исследования, корпоративные базы данных и образовательные ресурсы.

**Ключевые слова:** Интеллектуальная система навигации, обработка естественного языка, NLP, поиск информации, управление знаниями, машинное обучение, семантический анализ.

**Введение.** Современные информационные системы содержат огромные объемы данных, что делает навигацию и поиск информации чрезвычайно сложной задачей для пользователей. С ростом количества информации возникает потребность в более интеллектуальных и эффективных методах взаимодействия с этими системами. Традиционные методы поиска и навигации часто оказываются недостаточно эффективными, так как они могут не учитывать контекст, намерения и специфические потребности пользователей [1].

**Проблемы текущих систем навигации.** Существующие системы навигации, основанные на ключевых словах и фиксированных категориях, имеют ряд ограничений:

- ограниченная релевантность: поисковые запросы, основанные на ключевых словах, могут возвращать нерелевантные результаты, поскольку они не учитывают контекст и намерения пользователя;

- сложность использования: пользователи часто сталкиваются с трудностями при формулировке запросов, особенно если они не знают точных терминов или структуры данных;

- недостаток персонализации: Традиционные системы редко адаптируются к индивидуальным предпочтениям и поведению пользователя, что снижает их эффективность и удобство.

**Возможности NLP в навигации.** Технологии обработки естественного языка (NLP) предлагают значительный потенциал для улучшения навигации в информационных системах:

- понимание контекста: NLP позволяет системам лучше понимать контекст и намерения пользователя, что ведет к более релевантным результатам поиска.

- упрощение взаимодействия: интерфейсы на основе NLP позволяют пользователям взаимодействовать с системой на естественном языке, делая процесс поиска более интуитивным и доступным;

- персонализация: использование методов машинного обучения и NLP позволяет системам адаптироваться к поведению и предпочтениям пользователя, предлагая персонализированные рекомендации и результаты.

**Научная и практическая значимость исследования.** Описание интеллектуальной системы навигации на основе NLP имеет как научное, так и практическое значение:

- научная значимость: исследование внесет вклад в развитие методов и алгоритмов NLP, а также в теоретические основы построения эффективных навигационных систем.

- практическая значимость: внедрение такой системы улучшит пользовательский опыт, повысит эффективность поиска информации и может быть применено в различных областях, таких как медицина, образование, бизнес и государственное управление.

**Цели и задачи.** Учитывая вышеизложенные проблемы и возможности, основными целями исследования являются:

- описание системы навигации, использующей технологии NLP для улучшения релевантности и удобства поиска информации;

- оценка эффективности предложенной системы в сравнении с традиционными методами навигации;

- изучение влияния персонализации и адаптивности системы на пользовательский опыт.

Таким образом, данное исследование направлено на решение актуальных проблем навигации в информационных системах и обладает потенциалом для значительного улучшения существующих подходов и технологий.

**Обработка естественного языка (NLP).** Обработка естественного языка (Natural Language Processing, NLP) — это область искусственного интеллекта и вычислительной лингвистики, которая занимается взаимодействием между компьютерами и человеческими (естественными) языками. Цель NLP — дать компьютерам возможность понимать, интерпретировать и генерировать текст и речь на естественном языке. Эта область охватывает широкий спектр задач, таких как синтаксический и семантический анализ, машинный перевод, распознавание речи, генерация текста и многое другое [2].

**Основные концепции NLP.** Основные концепции NLP включают методы и техники, используемые для анализа, интерпретации и генерации естественного языка.

**Синтаксический анализ.** Синтаксический анализ — это процесс анализа структуры предложения, определяющий грамматические отношения между словами и фразами. Этот этап важен для понимания грамматического строения текста и является основой для многих задач обработки естественного языка (NLP), таких как машинный перевод, извлечение информации и понимание текста.

Основные этапы синтаксического анализа:

1. Токенизация: Разделение текста на отдельные элементы, такие как слова, фразы или предложения. Токенизация является базовым шагом в большинстве NLP-задач.

2. Лемматизация и стемминг: Преобразование слов к их базовой (лемма) или корневой (стем) форме. Лемматизация учитывает контекст и приводит слова к нормальной форме, в то время как стемминг обрезает окончания слов для получения корня.

3. Определение частей речи: процесс назначения каждой единице текста (токену) соответствующей грамматической категории (существительное, глагол и т.д.).

4. Парсинг: структурный анализ текста для определения синтаксических связей между словами. Включает методы построения синтаксических деревьев, такие как парсинг деревьев зависимостей и конституентный парсинг.

**Семантический анализ.** Семантический анализ — это процесс извлечения и интерпретации смысла текста. Он включает в себя определение значения слов и выражений в контексте, идентификацию связей между ними и понимание их общей значимости. Семантический анализ является важным шагом в обработке естественного языка (NLP), поскольку он помогает компьютерам "понимать" текст так, как это делает человек. Основные аспекты семантического анализа:

- **распознавание именованных сущностей (NER):** Идентификация и классификация именованных сущностей, таких как имена людей, названия мест и организаций.

- **разрешение анафор:** Определение референций в тексте, например, связь местоимений с соответствующими им существительными.

- **извлечение отношений:** Определение семантических связей между различными сущностями в тексте.

- **семантическое разложение:** преобразование текста в структурированные представления, отражающие его смысл.

**Информационные системы и навигация.** Под системой понимают любой объект, который одновременно рассматривается и как единое целое, и как объединенная в интересах достижения поставленных целей совокупность разнородных элементов. Системы значительно отличаются между собой как по составу, так и по главным целям.

В информатике понятие «система» широко распространено и имеет множество смысловых значений. Чаще всего оно используется применительно к набору технических средств и программ. Системой может называться аппаратная часть компьютера. Системой может также считаться множество программ для решения конкретных прикладных задач, дополненных процедурами ведения документации и управления расчетами. Добавление к понятию «система» слова «информационная» отражает цель ее создания и функционирования. Информационные системы обеспечивают сбор, хранение, обработку, поиск, выдачу информации, необходимой в процессе принятия решений задач из любой области. Они помогают анализировать проблемы и создавать новые продукты [3].

Информационная система – взаимосвязанная совокупность средств, методов и персонала, используемых для хранения, обработки и выдачи информации в интересах достижения поставленной цели.

Информационная система представляет собой хранилище информации, снабженное процедурами ввода, поиска, размещения и выдачи информации. Наличие таких процедур – главная особенность информационных систем, отличающих их от простых скоплений информационных материалов. Например, личная библиотека, в которой может ориентироваться только ее владелец, информационной системой не является. В публичных же библиотеках порядок размещения книг всегда строго определен. Благодаря ему поиск и выдача книг, а также размещение новых поступлений представляют собой стандартные процедуры, близкие к алгоритмам [4].

**Традиционные методы навигации и их недостатки.** Традиционные методы навигации в информационных системах включают в себя ряд подходов, которые были широко использованы в прошлом и до сих пор применяются в различных контекстах. Однако у них есть как преимущества, так и недостатки.

**Иерархическая навигация.** Это один из самых распространенных методов навигации, основанный на иерархической структуре данных. Пользователь перемещается по уровням, начиная с более общих к более конкретным категориям или страницам.

Преимущества:

- ясная структура: Пользователи могут легко понять, где они находятся и как перемещаться по системе;

- простота в реализации: легко создать и поддерживать иерархическую структуру.

Недостатки:

- глубокая вложенность: при слишком глубокой иерархии может потребоваться много шагов для достижения нужной информации;

- ограниченная гибкость: не всегда подходит для систем с большим объемом информации или динамически изменяющимся контентом.

Решение с помощью NLP:

- динамический поиск: вместо того чтобы проходить через многоуровневую иерархию, пользователи могут вводить запросы на естественном языке, и система моментально предоставит наиболее релевантные результаты;

- семантическое понимание: система понимает смысл запроса и может предложить наиболее подходящие разделы или документы, минуя лишние уровни навигации.

**Линейная навигация.** Пользователи последовательно переходят от одной страницы или раздела к другому, обычно по предопределенному порядку.

Преимущества:

- простота в использовании: легко понять и использовать для выполнения последовательных действий или процессов.

- понятность: пользователи могут четко видеть следующий шаг.

Недостатки:

- ограничение выбора: пользователи могут чувствовать себя ограниченными в выборе, особенно если им нужно быстро перейти к другой части системы.

- неэффективность для нелинейных задач: не подходит для задач, где пользователи могут выбирать разные пути.

Решение с помощью NLP:

- контекстуальный результаты: система предоставляет релевантные результаты независимо от текущего местоположения пользователя в системе, позволяя легко переключаться между разными задачами;

- интерактивные запросы: Пользователи могут уточнять свои запросы на ходу, и система будет адаптироваться, предоставляя необходимые данные без необходимости следовать предопределенной последовательности шагов.

**Сеточная навигация.** Использует сетку или таблицу для представления информации или ресурсов, которые пользователь может исследовать и выбирать.

Преимущества:

- организация: позволяет структурировать большие объемы информации и предоставлять быстрый доступ к различным элементам;

- визуальная ясность: легко воспринимаемая пользователем структура.

Недостатки:

- перегрузка информацией: слишком много элементов в сетке может затруднить поиск нужной информации;

- требуется дополнительная навигация: для обширных сеток может потребоваться дополнительная навигация для навигации внутри сети.

Решение с помощью NLP:

- фильтрация и сортировка: Система автоматически фильтрует и сортирует информацию на основе запроса пользователя, предоставляя только релевантные элементы;

- персонализированные результаты: Система может учитывать предыдущие запросы и поведение пользователя для предоставления персонализированных рекомендаций.



**Контекстная навигация.** Предоставляет пользователю доступ к контекстно зависимым ссылкам или ресурсам на основе их текущего положения или задачи.

Преимущества:

- релевантность: пользователи получают доступ к информации, которая наиболее полезна в текущий момент.

- эффективность: уменьшает количество шагов для выполнения задач.

Недостатки:

- сложность в понимании системы: пользователям может быть сложно предсказать, какие ресурсы будут доступны в следующем шаге.

- трудности в планировании: требуется более тщательное планирование и проектирование для эффективного использования.

Решение с помощью NLP:

- интеллектуальные подсказки: система предоставляет контекстуальные подсказки на основе текущих и предыдущих действий пользователя, упрощая навигацию и доступ к информации.

- единый поиск по контексту: пользователь может ввести запрос, и система предложит ссылки и ресурсы, релевантные текущей задаче, без необходимости переключаться между разными контекстами вручную.

**Интеллектуальная система навигации.** Интеллектуальная система навигации на основе обработки естественного языка (NLP) представляет собой комплексное решение, предназначенное для улучшения взаимодействия пользователей с информационными системами. Эта система использует передовые методы NLP для понимания и интерпретации пользовательских запросов, предоставляя точные и релевантные результаты поиска. В данном разделе подробно описаны архитектура, ключевые компоненты и функциональные возможности системы. На рисунке 1 представлена схема взаимодействия всех архитектурных элементов системы.



Рис. 1. Взаимодействие архитектурных элементов системы

**Интерфейс пользователя.** Интерфейс пользователя (UI) является ключевым элементом описываемой интеллектуальной системы навигации, отвечающим за ввод, передачу данных на естественном языке. Он обеспечивает интуитивное и удобное взаимодействие пользователя с системой, позволяя вводить запросы, получать релевантные результаты и эффективно использовать функциональность системы.

Главным компонентом пользовательского интерфейса в описываемой системе является поле для ввода запроса. С помощью этого компонента пользователь будет вводить интересующие его запросы на естественном языке. Для улучшения пользовательского опыта в этом компоненте также присутствуют:

- область подсказок – предлагает использовать ключевые слова и теги, которые относятся к системе для упрощения формулировки запроса;
- история предыдущих запросов пользователя, позволяющая добавить любой из сделанных ранее запросов в список избранных.

**Модуль обработки естественного языка.** Модуль обработки естественного языка (NLP) является центральным компонентом интеллектуальной системы навигации, отвечающим за понимание и интерпретацию запросов пользователя, сформулированных на естественном языке. Этот модуль выполняет различные этапы анализа текста, включая синтаксический и семантический анализ, извлечение сущностей и определение намерений, что позволяет системе точно и эффективно искать релевантную информацию.

**Предобработка текста.** На этапе предобработки текст запроса очищается и нормализуется для дальнейшего анализа. Шаги предобработки текста:

- токенизация: разделение текста на отдельные слова или токены;
- лемматизация и стемминг: приведение слов к их базовым формам для унификации;
- удаление стоп-слов: исключение общих слов (например, "и", "в", "на"), которые не несут значимой информации;
- обработка синтаксических конструкций: разрешение неоднозначностей и нормализация форматов (например, даты, чисел) [5].

**Синтаксический анализ.** Синтаксический анализ (парсинг) используется для определения грамматической структуры запроса. Его методы:

- дерево зависимостей: построение дерева, отражающего синтаксические связи между словами;
- конституентный парсинг: разделение текста на фразы и определение их роли в предложении.

**Семантический анализ.** Семантический анализ определяет смысл слов и выражений в контексте. Его методы:

- word embeddings: Представление слов в виде векторов, отражающих их значение в контексте (например, Word2Vec, GloVe);
- семантические сети и онтологии: Использование структурированных представлений знаний для понимания смысла слов и их связей [6].

**Извлечение сущностей (NER) и определение намерений.** Извлечение сущностей идентифицирует ключевые элементы запроса, такие как имена, даты, организации. Определение намерений устанавливает цель запроса пользователя.

**Анализ контекста.** Анализ контекста учитывает предыдущие запросы пользователя и текущее состояние сессии для улучшения точности интерпретации/

**Модуль поиска и извлечения информации.** Модуль отвечает за обработку запросов, полученных от модуля NLP, выполнение поиска в базе данных или других источниках информации и предоставление пользователю релевантных результатов. Этот модуль использует разнообразные алгоритмы и методы, чтобы обеспечить точный и быстрый поиск нужной информации.

**Индексирование данных.** Индексирование данных – это процесс подготовки и организации информации в базе данных для обеспечения эффективного поиска. Методы и технологии:

- создание инвертированного индекса: основной метод индексирования, при котором каждому термину (слову) соответствует список документов, в которых этот термин встречается;

- TF-IDF (Term Frequency-Inverse Document Frequency): используется для оценки важности термина в документе относительно всего корпуса документов;

- кластеризация и категоризация: Группировка данных по темам или категориям для упрощения поиска.

**Обработка запросов.** На этом этапе запросы, полученные от модуля NLP, нормализуются и преобразуются для выполнения поиска. Шаги:

- парсинг и анализ запроса: интерпретация структурированного запроса, полученного от модуля NLP;

- преобразование запроса: преобразование запроса в формат, подходящий для выполнения поиска (например, SQL для реляционных баз данных или запрос в Elasticsearch для полнотекстового поиска).

**Поиск и извлечение.** Выполнение поиска в базе данных или других источниках информации на основе преобразованного запроса. Методы:

- полнотекстовый поиск: использование технологий, таких как Elasticsearch, для выполнения полнотекстового поиска;

- семантический поиск: использование моделей NLP для понимания смысла запроса и нахождения релевантных документов;

- фасетный поиск: предоставление возможностей фильтрации результатов по различным атрибутам (фасетам), таким как дата, автор, категория.

**Ранжирование результатов.** Ранжирование найденных документов на основе их релевантности к запросу пользователя. Методы:

- алгоритмы ранжирования: Использование алгоритмов, таких как PageRank, BM25 или алгоритмы машинного обучения;

- ранжирование по релевантности: Оценка документов по их значимости и соответствию запросу.

**Фильтрация и сортировка.** Обеспечение возможности фильтрации и сортировки результатов поиска по различным критериям. Функции:

- фильтрация: фильтрация результатов по дате, категории, автору и другим атрибутам;

- сортировка: сортировка результатов по релевантности, дате публикации, популярности и другим критериям.

**Модуль обучения и адаптации.** Основная задача модуля — первичное обучение используемых моделей и обеспечение постоянного улучшения точности и эффективности системы путем дальнейшего обучения на основе новых данных и обратной связи пользователей. Этот модуль использует различные методы машинного обучения и глубокого обучения для обновления и адаптации моделей, что позволяет системе оставаться актуальной и точной в условиях постоянно меняющихся данных и пользовательских потребностей.

**Сбор данных для обучения.** Сбор данных является первым шагом в процессе обучения и адаптации. Включает в себя сбор новых данных, необходимых для обучения моделей, а также данные об использовании системы и обратную связь от пользователей. Методы и технологии:

- данные, подготовленные вручную: пример возможных запросов пользователей и ответов со стороны моделей;

- логи использования системы: сбор логов запросов пользователей, взаимодействий и результатов поиска;

- обратная связь пользователей: сбор отзывов, оценок и комментариев от пользователей;

- автоматическое извлечение данных: автоматический сбор данных из внешних источников, таких как научные публикации, корпоративные базы данных и открытые данные.

**Обработка и подготовка данных.** Обработка и подготовка данных включает очистку, нормализацию и преобразование собранных данных в формат, пригодный для обучения моделей [7]. Методы:

- очистка данных: удаление шумовых данных, дублированных записей и аномалий;

- аугментация данных: создание дополнительных данных путем различных трансформаций для улучшения качества обучения;

- форматирование данных: преобразование данных в нужный формат для обучения моделей (например, векторы для моделей машинного обучения).

**Обучение моделей.** Процесс обучения моделей включает использование подготовленных данных для создания новых или обновления существующих моделей машинного обучения. Методы:

- машинное обучение: Использование алгоритмов, таких как решающие деревья, случайные леса, градиентный бустинг;

- глубокое обучение: Использование нейронных сетей, таких как CNN, RNN, LSTM и трансформеры;

- обучение с учителем и без учителя: Обучение моделей с использованием размеченных данных (с учителем) и неразмеченных данных (без учителя) [8].

**Адаптация моделей.** Адаптация моделей включает регулярное обновление и настройку моделей на основе новых данных и изменяющихся условий. Методы:

- онлайн-обучение: непрерывное обучение модели на новых данных по мере их поступления;

- transfer learning (перенос обучения): использование предварительно обученных моделей и адаптация их к новой задаче;

- reinforcement learning (обучение с подкреплением): обучение модели на основе обратной связи и результатов взаимодействия с пользователями.

**Оценка и тестирование моделей.** Оценка и тестирование моделей проводится для проверки их точности и эффективности перед внедрением в продуктивную среду. Методы:

- кросс-валидация: Разделение данных на тренировочные и тестовые наборы для проверки модели;

- метрики оценки: Использование метрик, таких как точность, полнота, F1-мера, для оценки качества модели;

- A/B-тестирование: Сравнение производительности различных версий модели на реальных данных [7].

**Внедрение и мониторинг моделей.** Внедрение моделей в продуктивную среду и постоянный мониторинг их работы для обеспечения стабильности и корректировки при необходимости. Методы:

- CI/CD (Continuous Integration/Continuous Deployment): автоматизация процессов интеграции и развёртывания моделей;

- мониторинг производительности: постоянный мониторинг производительности модели и её корректировка в случае необходимости;

- обратная связь и улучшение: сбор обратной связи от пользователей и использование её для дальнейшего улучшения моделей.

**Выводы.** Предлагаемая интеллектуальная система навигации на основе обработки естественного языка демонстрирует значительные преимущества в области управления и поиска информации - обеспечивает высокую точность, релевантность и эффективность, что подтверждается теоретическим обоснованием и практическими результатами. Продолжение исследований и разработок в данном направлении откроет новые возможности для улучшения информационных систем и расширения их применения в различных сферах деятельности.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Компанеетс, М. А. Навигационные средства веб-сайта / М. А. Компанеетс // Молодой ученый. – 2016. – № 9 (36). – С. 141-145.
2. Обработка естественного языка [Электронный ресурс] / Викиконспекты [Сайт]. – URL: [https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=Обработка естественного языка](https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=Обработка_естественного_языка) (дата обращения 24.05.2024).
3. Избачков, Ю. С. Информационные системы / Ю. С. Избачков, В. Н. Петров. – 2-е изд. – СПб.: Питер, 2008. – 655 с.
4. Барахнин, В. Б. Информационная система: взгляд на понятие / В. Б. Барахнин, А. М. Федотов // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. – 2007. – Т. 5, № 2. – С. 12-19.
5. Jurafsky, D. Speech and Language Processing (3rd ed.) / D. Jurafsky, J. Martin. – Pearson, 2021. – 988 p.
6. Морозов, А. А. Введение в обработку естественного языка / А. А. Морозов. – М.: Наука, 2018. – 384 с.
7. Волков, С. И. Методы и алгоритмы машинного обучения / С. И. Волков. – М.: Наука, 2016. – 368 с.
8. Редько, В. Г. Основы машинного обучения / В. Г. Редько. – М.: Лаборатория знаний, 2016. – 320 с.

*Поступила в редакцию 01.07.2024 г., рекомендована к печати 16.08.2024 г.*

#### INTELLIGENT NAVIGATION SYSTEM BASED ON NATURAL LANGUAGE PROCESSING

*Rudak L.V., Zori S.A.*

This article discusses the structure and application of an intelligent navigation system based on natural language processing (NLP). The system is designed to simplify navigation and search for information in complex information systems. The main focus is on the system architecture, which includes modules for natural language processing, information search and retrieval, knowledge management, and learning and adaptation. The results of the study demonstrate that the system can significantly improve the accuracy and efficiency of information retrieval, making it useful for applications in various fields such as scientific research, corporate databases and educational resources.

**Keywords:** intelligent navigation system, natural language processing, NLP, information retrieval, knowledge management, machine learning, semantic analysis.

#### **Рудак Леонид Викторович**

аспирант кафедры программной инженерии им. Л.П. Фельдмана ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: leo2598@yandex.com

#### **Rudak Leonid Viktorovich**

Postgraduate student at Department of Software Engineering of Donetsk State 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 Department of Software Engineering of Donetsk State Technical University. Russian Federation, DPR, Donetsk

## АНАЛИЗ СТРУКТУР СИСТЕМ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ТРАНСПОРТИРОВКИ ГРУЗОВ С ПОМОЩЬЮ ГЕТЕРОГЕННОЙ ГРУППЫ БПЛА С УЧЕТОМ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

© 2024 Саломатин А.А.

---

В работе представлено математическое обеспечение систем информационной поддержки транспортировки грузов с помощью гетерогенной группы беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с учетом метеорологических условий и проведен анализ структур данных систем для их дальнейшего развития. Актуальность исследования обусловлена возникновением новых требований к созданию интеллектуальных транспортных систем с использованием современных телекоммуникационных технологий, обеспечивающих информационную интеграцию транспортных систем и реализацию высокоэффективных товаротранспортных и логистических технологий. В ходе работы проведен анализ применимости беспилотных авиационных систем для транспортировки грузов в России и за рубежом. Описана содержательная и математическая постановка задачи управления гетерогенной группой БПЛА при транспортировке грузов. Отдельного внимания заслуживает учет метеорологических характеристик в моделях и методах группового управления БПЛА при транспортировке грузов. Краткий обзор существующих решений показал, что на текущий момент возможно их дальнейшее улучшение за счет рассмотрения новых характеристик, как метеорологических характеристик, так и летно-технических характеристик БПЛА, связанных с ними. Более того, отмечено отсутствие комплексного, полного учета метеорологических характеристик в математических моделях управления БПЛА в транспортировке грузов, что также может оказаться перспективным направлением для дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** БПЛА, БАС, управление, транспортировка грузов, метеорологические условия, группа БПЛА, информационная поддержка.

---

**Введение.** По мере совершенствования систем связи, навигации, управления, появления новых материалов и технологий возникли предпосылки для использования беспилотных летательных аппаратов для решения более широкого круга задач. В гражданской сфере это решение задач геодезии, картографии, геологоразведки, медицинской помощи, авиационных сельскохозяйственных работ и транспортных перевозок. Промышленное применение беспилотных летательных аппаратов в качестве авиационных транспортных средств находится на ранней стадии развития. БПЛА различной размерности могут обеспечить доставку широкого спектра грузов – от дальних перевозок габаритных объектов до непосредственной доставки грузов группам получателей, оторванных от магистральных доставок [1].

Использование беспилотных летательных аппаратов для доставки посылок преодолевает ограничения пространства на местности, сокращает рабочую силу, потребление, является более дешевым и гибким, и, таким образом, компенсирует недостатки традиционной логистики. В горных районах и сельской местности, где не хватает людских ресурсов, беспилотные летательные аппараты также могут быстро доставлять грузы. Поэтому доставка с использованием технологии беспилотных летательных аппаратов привлекла внимание многих исследователей.

Следует отметить предпосылки для создания транспортных беспилотных авиационных систем (БАС): накоплен научно-технический задел для разработки и производства БПЛА; возросли возможности БПЛА по грузоподъемности, дальности полета, надежности, автономности и др.; наработан опыт применения БПЛА в других областях применения; возросла потребность государства, и общества в функциональных

сервисах по качественной доставке грузов; возросла безопасность применения БПЛА; появился задел в области создания нормативно-правовой и нормативно-технической базы; развивается база для обучения специалистов по эксплуатации БПЛА [2].

Существуют виды деятельности, в которых имеется мировой опыт использования БПЛА для доставки грузов:

- интернет-торговля;
- почтовое обслуживание;
- доставка медикаментов и медицинского оборудования;
- розничная торговля и общественное питание;
- гуманитарные операции и работа в условиях чрезвычайных ситуаций;
- доставка грузов в рамках промышленной кооперации;
- доставка военных грузов при материально-техническом обеспечении воинских формирований.

В доставке грузов электронной коммерции наиболее преуспели Китай и США. Программы по доставке грузов проводят гиганты электронной торговли: Amazon (программа Prime Air) и JD.com. Китайская компания JD.com, занимающаяся интернет-торговлей, запустила в 2015 году экспериментальную программу доставки грузов потребителям. Цель программы – реализовать доступность продуктов электронной коммерции для сельских жителей [3]. В год совершается около 10000 полетов по доставке грузов с налетом более 3000 часов. Экспериментальная программа Prime Air Amazon проводится в Великобритании с 2016 года [4]. Цель программы — доставка товаров весом менее 2,3 кг в течение получаса потребителю. Разработчики БПЛА: США, Великобритания, Израиль, Австрия, Франция. В испытаниях принимают участие более десяти различных прототипов, предназначенных для разных целей.

В сфере почтового обслуживания проводят эксперименты крупнейшие мировые почтовые компании немецкая DHL и американская UPS [5, 6]. DHL проводит экспериментальную программу по доставке почтовых отправлений с 2013 года. Система состоит из БПЛА и наземного автоматизированного пункта приема и отправки сообщений. UPS компания экспресс доставки, начала эксперименты по использованию БПЛА в 2017 году. Отличие от системы DHL – наземная станция находится на почтовом грузовом автомобиле.

В России активно ведутся разработки по доставке почтовых отправлений с помощью БПЛА. До конца 2021 г. компании провели первые тестовые полеты по маршруту Анадырь - Угольные Копи на Чукотке.

В области медицины наиболее масштабная программа была организована в Африке, первоначально в Руанде. Разработчик компания Zipline (США), заказчик – правительство Руанды и глобальный альянс по вакцинации и иммунизации [7].

Программа Matternet (США), заказчик - министерство здравоохранения Швейцарии. Цель программы – доставка крови и образцов биоткани между клиниками и лабораториями [8].

Как можно заметить, применение БАС в задаче транспортировки грузов является актуальным как в России, так и за рубежом. Более того, можно прогнозировать, что использование БАС для решения данной задачи будет востребовано и в ближайшем будущем.

Текущее исследование направлено на обзор структур систем информационной поддержки транспортировки грузов с помощью гетерогенной группы БПЛА с учетом метеорологических условий, что может дать возможности для дальнейших исследований, в том числе для разработки информационного и алгоритмического

обеспечения системы информационной поддержки транспортировки грузов с помощью гетерогенной группы беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), позволяющих оптимизировать организацию и управление транспортной длительностью.

Целью работы является определение путей улучшения математического обеспечения систем информационной поддержки транспортировки грузов с помощью гетерогенной группы БПЛА с помощью анализа структур этих систем с учетом метеорологических условий.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

- 1) формализовать задачу управления гетерогенной группой БПЛА для транспортировки грузов с учетом метеорологических условий;
- 2) провести обзор моделей и методов группового управления БПЛА в задаче транспортировки грузов на учет метеорологических характеристик.
- 3) выявить характеристики для разработки новых математических моделей группового управления БПЛА в задаче транспортировки грузов

**Моделирование управления в системах.** Сложность моделирования системы управления авиаперевозками заключается в том, что отрасль авиаперевозок одновременно является и производственной структурой, и сферой предоставления услуг. Задача построения адекватной обобщенной математической модели системы управления авиаперевозками представляется задачей сложно формализуемой и вряд ли будет решена в ближайшее время.

Ввиду вышеизложенного для проведения анализа и синтеза модели управления авиаперевозками целесообразно ограничить выбор наиболее важными и критичными аспектами этого процесса, оказывающими значительное влияние на эффективность систем управления авиаперевозками. Построение модели системы управления авиаперевозками сводится к формализации процесса принятия управленческих решений по одному из направлений функционирования авиаперевозок. Основными ограничениями в оптимизационных задачах управления авиаперевозками являются ресурсы, и спрос на авиаперевозки. При постановке оптимизационных задач специфика авиаперевозок заключается в характерной двойственности процесса. С одной стороны, требуется полное удовлетворение потребности спроса на авиаперевозки. С другой стороны, авиаперевозки должны быть прибыльны и рентабельны, что не всегда совпадает с полным удовлетворением спроса при минимальном использовании ресурсов. Отсюда возникает необходимость решения задачи максимизации удовлетворения спроса при определенных ресурсных затратах. Таким образом, общая задача оптимизации управления перевозками определяется в математическом виде как двойственная задача на минимакс [9].

В работе [10] моделирование процессов производится из расчета оптимизации расстановки транспортных средств по авиалиниям с учетом величин прямых и трансферных пассажиропотоков; определения числа рейсов, выполняемых транспортными средствами в течение недели (недельной частоты движения); распределения рейсов по интервалам времени, соответствующим волнам их прибытий-отправлений в хабе. Однако, критерием оптимальности является операционная прибыль авиакомпании.

Эффективной бизнес-моделью, широко используемой зарубежными авиакомпаниями и внедряемой некоторыми их российскими коллегами, является модель авиаперевозок «ось–спицы» («hub-and-spoke»), в которой один из аэропортов, обслуживаемых сетью авиалиний авиакомпании, используется в качестве пересадочного узла для организации перевозок между другими (периферийными) аэропортами этой



сети. Сформированная на базе хаба радиальная сеть авиалиний называется маршрутной сетью «ось–спицы», а расписание движения летательных аппаратов в пределах этой сети – «веерным» расписанием [11]. Особенность веерного расписания – волновой принцип, предполагающий наличие в течение непродолжительного интервала времени большого числа сначала прибывающих в хаб, а затем отправляющихся из хаба рейсов. Реализация волнового принципа позволяет трансферным пассажирам, совершающим пересадку в хабе, избежать длительного ожидания стыковочного рейса. Маршрутная сеть авиакомпании, использующей направленный хаб, строится таким образом, чтобы полеты начинались в периферийном аэропорту «по одну сторону» от хаба, а заканчивались – «по другую сторону» от него. Для перевозок через направленный хаб используются транспортные средства одного или нескольких близких типов. Перевозки через всенаправленный хаб требуют применения разнообразного авиапарка. Принятию решения авиакомпании о переходе к работе в соответствии с моделью «ось–спицы» должен предшествовать детальный технико-экономический анализ, содержащий решение задачи оптимизации управления авиаперевозками, включающей комплекс оптимизационных подзадач.

Проведенное исследование авиаперевозок позволяет организовать формализацию задачи. Рассмотрим содержательное описание.

**Формализация задачи.** Пусть имеется некоторое количество потребителей материально-технических средств, распределенных в пространстве. От всех или некоторых потребителей в текущий момент времени имеются заявки на доставку материальных средств. Заявки могут быть плановыми либо срочными. Далее будем называть материальные средства грузами, а места нахождения потребителей, от которых имеются заявки – стоками.

Имеется центр обработки заявок, в задачи которого входит прием заявок на доставку грузов, их обработка, планирование процессов выполнения доставок и контроль их осуществления.

На местности расположены пункты хранения грузов (склады), которые характеризуются местоположением (координатами) и объемами хранящихся в текущий момент времени грузов различных типов. Будем далее называть такие пункты источниками.

Каждый груз в источнике, помимо типа, характеризуется габаритными размерами, массой, условиями хранения и транспортировки, приоритетностью доставки и/или другими свойствами.

Транспортные средства (БПЛА) базируются в местах расположения грузов, т.е. в источниках. Каждое транспортное средство характеризуется грузоподъемностью, объемом перевозимых грузов, коэффициентами использования грузоподъемности, скоростью движения, временем подготовки к повторному применению и/или другими параметрами.

Заданы параметры инфраструктуры (технические и эксплуатационные характеристики пунктов расположения грузов, координаты и характеристик пунктов технического обслуживания транспортных средств и др.). Также имеется информация о возможности или невозможности различных пунктов принимать и обслуживать БПЛА различных типов.

Известна метеорологическая обстановка, которая характеризуется осадками, направлением и силой ветра, вероятностью возникновения неблагоприятных погодных условий и/или др.

Имеется маршрутная сеть воздушного транспорта, заданная в виде сети маршрутов с привязкой к координатам. Предполагается, что для каждого маршрута могут быть рассчитаны затраты ресурсов при полете по нему БПЛА различных типов: время прохождения (включая время полета и время выполнения подготовительных и сопутствующих операций – зарядка батарей, взлет, маневрирование, посадка и др.).

Маршрутная сеть является динамической. Под динамичностью подразумевается возможность динамического изменения ее параметров, в зависимости от изменения погодных условий, изменения состояния парка транспортных средств и инфраструктуры, административных решений и др. Изменения могут состоять в ограничении пропускной способности маршрутов, запрете полета по определенным маршрутам для всех или некоторых транспортных средств, приоритизации маршрутов и др.

Требуется разработать сценарий транспортировки грузов из источников в стоки так, чтобы удовлетворить потребности стоков, учитывая территориальное расположение источников и стоков, доступность и технические характеристики БПЛА, состояние маршрутной сети. При этом сценарий должен быть эффективным по ряду показателей, среди которых могут быть время доставки, затраты ресурсов, степень удовлетворения потребностей, рациональность загрузки БПЛА и др. На основе разработанного сценария сформировать множество миссий и набор полетных заданий.

С учетом приведенного содержательного описания, формализация задачи транспортировки грузов может быть представлена следующим образом:

1) Множество источников  $S$ . Каждый источник  $S_i$  характеризуется набором параметров  $SP_i$ .

$$S = \{S_1, S_2, \dots\}.$$

2) Множество стоков  $D$ . Каждый сток  $D_j$  характеризуется набором параметров  $DP_j$ .

$$D = \{D_1, D_2, \dots\}.$$

3) Множество промежуточных пунктов  $Q$  (технического обслуживания, до загрузки и т.д.). Каждый такой пункт  $Q_r$  характеризуется набором параметров  $QP_r$ .

$$Q = \{Q_1, Q_2, \dots\}.$$

4) Множество грузов различных типов  $G$ . Каждый тип груза  $G_k$  характеризуется набором параметров  $GP_k$ .

$$G = \{G_1, G_2, \dots\}.$$

5) Матрица, элементы которой задают величины запасов груза  $k$ -го типа в источнике  $S_i$ . Предполагается, что  $T(S_i, G_k) \geq 0 (S_i \in S, G_k \in G)$ .

$$T^S = \|T(S_i, G_k)\|.$$

6) Матрица, элементы которой задают величины потребностей в грузе  $k$ -го типа в стоке  $D_j$ . Предполагается, что  $T(D_j, G_k) \geq 0 (D_j \in D, G_k \in G)$ .

$$T^D = \|T(D_j, G_k)\|.$$

7)  $A = \{A_1, A_2, \dots\}$  – множество транспортных средств (БПЛА). Каждое транспортное средство  $A_l$  характеризуется набором параметров  $A_{P1}$ .

8)  $V = \left\| \left\| V(S_j, A_l) \right\| \right\|$  – распределение БПЛА различных типов по местам расположения грузов (источникам). Элементы матрицы задают количество единиц БПЛА 1-го типа, находящихся в текущий момент в источнике  $S_i$ .

9)  $R$  – маршрутная сеть. Задается следующим набором параметров:

$$R \langle S, D, Q, \Gamma, C, U \rangle, .$$

где  $\Gamma = \{ \Gamma_f \}$  – карта (граф) маршрутов с привязкой к координатам;

$C = \left\{ \left\| C_f(A_l, Y_p) \right\| \right\}$  – множество матриц, задающее затраты ресурсов из множества  $Y = \{ Y_p \}$  при использовании транспортного средства  $A_l$  на маршруте  $\Gamma_f$ ;

$U = \left\{ \left\| U(A_l, \Gamma_f) \right\| \right\}$  – матрица дополнительных ограничений маршрутной сети, которые могут включать в себя ограничения по пропускной способности отдельных маршрутов, «запрещенные» маршруты и т.п. Ограничения могут быть различными для разных типов БПЛА.

Определим элемент сценария как транспортировку заданного количества единиц груза  $G_k$  по маршруту  $\Gamma_f$  с использованием транспортного средства  $A_l$ . Будем обозначать его  $x_{k,f,l}$ .

Тем самым, сценарий транспортировки грузов может быть задан следующим образом:

$$X = \left\{ x_{k,f,l} = x(G_k, \Gamma_f, A_l) \mid G_k \in G, \Gamma_f \in \Gamma, A_l \in A \right\}.$$

Можно сформулировать следующую обобщенную задачу оптимизации:

$$E(X, R, T^S, T^D, Z) \rightarrow \max, X \in X_F.$$

где  $E = \{E_1, E_2, \dots\}$  – эффективности сценариев по выбранному множеству показателей;  
 $X_F$  – множество допустимых сценариев.

К условиям, определяющим допустимость сценариев, в частности, относятся:

- удовлетворение системе ограничений маршрутной сети;
- допустимость использования БПЛА определенного типа для транспортировки соответствующего груза;
- доступность БПЛА для перевозки конкретного груза;
- согласованность сценария с распределением запасов и потребностей по всем видам грузов во всех источниках и стоках.

**Анализ развития математического обеспечения систем.** Рассмотрим, какие метеорологические характеристики используются исследователями для решения задачи транспортировки грузов, где производится построение маршрутной сети и выбор транспортных средств с заданными характеристиками.

В работе [12] развивается подход к формированию наискорейших маршрутов полета легкого беспилотного летательного аппарата (БПЛА) в поле постоянного ветра на основе решения разновидностей задачи коммивояжера и учитывается скорость и направление ветра. Данные метеорологические характеристики также учитываются в работе [13], где проводится сравнительный анализ нескольких вариантов разработанного авторами программно-алгоритмического обеспечения решения задач маршрутизации полета легкого беспилотного летательного аппарата в поле постоянного ветра.

В работе [14] проводится анализ моделей и алгоритмов задачи маршрутизации транспортных средств. В [15] проводится анализ применения муравьиного алгоритма для оптимизации в задаче маршрутизации с временными окнами. В [16] проводится анализ применения генетического алгоритма для оптимизации в задаче маршрутизации. Несмотря на то, что маршрутизация используется в задаче транспортировки грузов, в данных работах не учитываются метеорологические характеристики.

Работа [17] посвящена разработке алгоритмов маршрутизации дронов для БАС с учетом трех основных аспектов маршрутизации дронов: планирования траектории, зарядки и безопасности, где учитывается наличие экстремальных погодных условий (сильный ветер, снег, дождь), но без детального анализа и без предположений о полете БПЛА в таких условиях.

В [18] исследуется влияние ветра на маршрут полёта беспилотного летательного аппарата, а также влияние обледенения на применение беспилотного летательного аппарата.

Работа [19] хоть и не посвящена напрямую транспортировке грузов, но отмечает возможные критические отказы и их последствия, возникающие в ходе проведения испытаний беспилотных летательных аппаратов военного и специального назначения. Учитывается вероятность обледенения, наличие дождя, снега, града, тумана и грозы, вероятность удара молнии в БПЛА, скорость и направление ветра.

Примечательна работа [20], в которой проводится анализ открытых литературных источников по вопросам эксплуатации и практического применения БПЛА в условиях воздействий факторов внешней среды. В качестве метеорологических характеристик рассматривают высоту нижней границы облачности, метеорологическую дальность видимости, скорость ветра, наличие явления погоды (гроза, обледенение, тряска БПЛА).

Скорость ветра, наличие тумана, дождя, снега, температура, вероятность обледенения, направление ветра учитывается в работе [21], где исследуется влияние метеоусловий на полет БПЛА серии SUPERCAM и выработка рекомендаций по их управлению в зависимости от метеоусловий.

Анализ эффективности транспортировки компонентов крови с применением БПЛА, представляющей собой транспортную задачу, представлена в [22]. В работе упоминаются две метеорологические характеристики, влияющие на полет БПЛА – температура местности и скорость ветра.

Обзору существующих методов доставки, а также проектов различных крупных компаний, с применением БПЛА посвящена работа [23], однако метеорологические характеристики не рассматриваются.

Полету БПЛА в метеорологических условиях посвящены и зарубежные исследования. Например, разработанная стратегия восстановления связи БПЛА в метеорологических условиях отражена в [24]. В работе учитываются наличие дождя, тумана, снега, интенсивность осадков. Однако, в данном случае БПЛА не занимается грузоперевозкой.

В свою очередь в работах [25, 26], посвященных поиску решений для транспортной задачи и её подзадач, метеорологические характеристики отсутствуют. В последней разработана математическая модель маршрутизации дронов на производственном предприятии. В другой работе проводится сравнительный анализ алгоритмов маршрутизации БПЛА при транспортировке грузов. Формированию сценариев доставки грузов с помощью БАС посвящена работа [27]. Разгрузка товара при транспортировке грузов с помощью БПЛА оптимизируется в [28]. Алгоритм планирования доставки грузов с помощью БАС на основе алгоритма К-средних и генетического алгоритма разрабатывается в [29].

Таким образом, в качестве путей развития систем информационной поддержки транспортировки грузов с помощью гетерогенной группы БПЛА можно предложить улучшение существующих моделей управления за счет внедрения новых метеорологических характеристик или связанных с ними, например, кода IP, с помощью которого можно описывать защиту БПЛА от снега, снежной крупы или дождя. Другие метеорологические характеристики в работах учитываются, однако по большей части при проведении натурных экспериментов, нежели в комплексных математических моделях управления в транспортировке грузов, где их использование может повлиять на построение метеорологических ограничений маршрутной сети или выбор транспортных средств с заданными характеристиками.

**Заключение.** Был проведен анализ существующих структур систем информационной поддержки транспортировки грузов с помощью гетерогенной группы БПЛА. Описана практическая значимость и применение БАС для транспортировки грузов в России и за рубежом. Сделана формализация задачи транспортировки грузов с помощью гетерогенной группы БПЛА в содержательном и математическом виде. Представлены методы группового управления БПЛА, используемые исследователями при решении задачи транспортировки грузов и доступные для внедрения в системы информационной поддержки транспортировки грузов с помощью гетерогенной группы БПЛА. Проведенный анализ методов показал, что существует большое количество различных метеорологических характеристик, которые стоит учитывать для допуска БПЛА к полету и повышения эффективности транспортировки грузов, однако в задачах транспортировки грузов и её подзадачах не используются ряд характеристик, связанных с метеорологическими условиями – снегом, градом и снежной крупой, дождём. Это создаёт перспективы для разработки нового обеспечения системы информационной поддержки транспортировки грузов с помощью гетерогенной группой БПЛА в задаче транспортировки грузов, учитывающего новые метеорологические характеристики и способствующего повышению эффективности транспортировки грузов.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шуть В.Н., Персия Л. Интеллектуальные робототехнические транспортные системы / В. Н. Шуть, Л. Персия. – Брест: Издательство УО «БрГТУ», 2017. – 196 с.
2. Жанказиев, С. В. Основные научные подходы к разработке нештатных режимов управления ИТС / С. В. Жанказиев, А. И. Воробьев, М. В. Гаврилюк // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2017. – № 3(81). – С. 24-27. – EDN ZRBSBR.
3. Ли, Ц. Проблемы и перспективы развития российско-китайской трансграничной электронной коммерции / Ц. Ли // Инновации и инвестиции. – 2020. – № 6. – С. 65-70. – EDN НННУСЛ.
4. Официальный сайт компании Amazon (Prime Air) [сайт]. – URL: <https://www.amazon.com/Amazon-Prime-Air/node=8037720011> (дата обращения 23.10.2021).
5. Официальный сайт компании DHL [сайт]. – URL: <https://www.logistics.dhl.ru/ru/ru/home.html?locale=true> (дата обращения 23.10.2021).
6. Официальный сайт компании UPS [сайт]. – URL: <https://www.ups.com/ru/ru/Home.page> (дата обращения 23.10.2021).
7. Официальный сайт компании Zipline [сайт]. – URL: <https://flyzipline.com> (дата обращения 23.10.2021).
8. Официальный сайт компании Matternet [сайт]. – URL: <https://mtr.net> (дата обращения 23.10.2021).

9. Павлова, Л. В. Моделирование системы управления авиаперевозками / Л. В. Павлова, Н. И. Романчева // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2016. – Т. 2. – С. 237-238.
10. Потапов, И. В. Синтез оптимального управления трансферными авиаперевозками методами математического программирования / И. В. Потапов, В. А. Романенко // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 3(19). – С. 75-86. – EDN OOLMZX.
11. Романенко, В. А. Математические модели функционирования аэропортов в условиях современного авиатранспортного рынка / В. А. Романенко. – Самара: Издательство «АсГард», 2010. – 244 с.
12. Маршрутизация полета легкого беспилотного летательного аппарата в поле постоянного ветра на основе решения разновидностей задачи коммивояжера / Д. В. Моисеев, В. М. Чинь, Л. А. Мозолев [и др.] // Труды МАИ. – 2015. – № 79. – С. 8. – EDN TPEPXN.
13. Моисеев, Д. В. Вычислительные аспекты и прикладное программное обеспечение оптимальной маршрутизации полета легкого беспилотного летательного аппарата в поле постоянного ветра / Д. В. Моисеев, В. М. Чинь // Интернет-журнал Науковедение. – 2017. – Т. 9, № 3. – С. 92. – EDN ZEISNV.
14. Solving the Vehicle Routing Problem using Genetic Algorithm / A. Kadar, A. Masum, M. Faruque [et al.] // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. – 2011. – P. 2.
15. Liong, C. Y. Vehicle routing problem: Models and solutions / C. Y. Liong, I. Wan, K. Omar // Journal of Quality Measurement and Analysis. – 2008. – V. 4. – P. 205-218.
16. A Comprehensive Study of Vehicle Routing Problem With Time Windows Using Ant Colony Optimization Techniques / A. Neogi, S. Mounika, S. Kalyan, S. Sai // International Journal of Engineering and Technology (UAE). – 2018. – V. 7. – P. 80-85.
17. Потапов, И. В. Синтез оптимального управления трансферными авиаперевозками методами математического программирования / И. В. Потапов, В. А. Романенко // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 3(19). – С. 75-86. – EDN OOLMZX.
18. Горбунов, А. А. Влияние метеорологических факторов на применение и безопасность полёта беспилотных летательных аппаратов с бортовым ретранслятором радиосигнала / А. А. Горбунов, А. Ф. Галимов // Научно-аналитический журнал "Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России". – 2016. – № 2. – С. 7-15. – EDN WAZOXP.
19. Обеспечение безопасности испытаний беспилотных летательных аппаратов военного и специального назначения / Е. А. Антохин, Н. Н. Панасенко, О. И. Атакишев, П. Д. Чернова // Известия Института инженерной физики. – 2019. – № 2(52). – С. 71-76. – EDN EKSXVF.
20. Методика учета влияния метеорологических факторов на эффективность применения беспилотных летательных аппаратов на основе системного анализа / И. Е. Кузнецов, А. В. Мельников, Е. А. Рогозин, О. В. Страшко // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2018. – Т. 45, № 2. – С. 125-139. – DOI 10.21822/2073-6185-2018-45-2-125-139. – EDN YPTDJV.
21. Анализ статистических данных о полетах беспилотных летательных аппаратов серии SUPERCAM в сложных метеоусловиях для картографии и видеоразведки / А. В. Лазуткин, Р. А. Урванцев, А. В. Флоров, М. В. Шинкевич // Перспективы развития и применения комплексов с беспилотными летательными аппаратами: сборник статей и докладов по материалам ежегодной научно-практической конференции. – 2016. – С. 268-272.
22. Опыт транспортировки компонентов крови с применением беспилотного летательного аппарата / А. М. Носов, А. И. Савельев, В. Н. Вильянинов [и др.] // Медицина катастроф. – 2022. – № 3. – С. 65-69. – DOI 10.33266/2070-1004-2022-3-65-69. – EDN TLMWHJ.
23. Костин, А. С. Методы доставки грузов при помощи беспилотных летательных аппаратов / А. С. Костин, Д. В. Еленин // Системный анализ и логистика. – 2020. – № 1(23). – С. 55-64. – EDN UEVMPF.
24. UAV Communication Recovery under Meteorological Conditions / S. Mengan, H. Yiming, L. Zhonghua [et al.] // Drones. – 2023. – V. 7. – P. 423.
25. Boychev, I. Research algorithms to optimize the drone route used for security / I. Boychev // 2018 IEEE XXVII International Scientific Conference Electronics – ET. – 2018. – P. 1–4.
26. Derpich, I. Using drones in a warehouse with minimum energy consumption / I. Derpich, D. Miranda, J. Sepulveda // 2018 7th International Conference on Computers Communications and Control. – 2018. – P. 97–102.
27. Dynamic Programming Approach for Drone Routes Planning / H. Gjorshevski, K. Trivodaliev, I. N. Kosovic [et al.] // 2018 26th Telecommunications Forum (TELFOR). – 2018. – P. 1-4.
28. Tanaka S. High-speed UAV Delivery System with Non-stop Parcel Handover Using High-speed Visual Control / S. Tanaka, T. Senoo, M. Ishikawa // 2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC). – 2019. – P. 4449–4455.
29. Pan, S. UAV Delivery Planning Based on K-Means++ Clustering and Genetic Algorithm / S. Pan // 2019 5th International Conference on Control Science and Systems Engineering (ICCSSE). – 2019. – P. 14–18.

*Поступила в редакцию 02.07.2024 г., рекомендована к печати 16.08.2024 г.*

**ANALYSIS OF STRUCTURES OF INFORMATION SUPPORT SYSTEMS FOR CARGO  
TRANSPORTATION USING A HETEROGENEOUS GROUP OF UAVS TAKING INTO ACCOUNT  
METEOROLOGICAL CONDITIONS**

*Salomatin A.A.*

The paper presents mathematical support for systems of information support of cargo transportation using a heterogeneous group of unmanned aerial vehicles (UAVs) taking into account meteorological conditions and analyzes the structures of these systems for their further development. The relevance of the study is due to the emergence of new requirements for the creation of intelligent transportation systems using modern telecommunication technologies that provide information integration of transportation systems and the implementation of highly efficient goods transportation and logistics technologies. The paper analyzes the applicability of unmanned aircraft systems for cargo transportation in Russia and abroad. The substantive and mathematical formulation of the task of controlling a heterogeneous group of UAVs during cargo transportation is described. The consideration of meteorological characteristics in models and methods of UAV group control during cargo transportation deserves special attention. A brief review of existing solutions has shown that at the moment it is possible to further improve them by considering new characteristics, both meteorological characteristics and flight-technical characteristics of UAVs associated with them. Moreover, there is a lack of comprehensive, full consideration of meteorological characteristics in mathematical models of UAV control in cargo transportation, which may also be a promising area for further research.

**Keywords:** UAV, UAS, control, cargo transportation, meteorological conditions, UAV group, information support.

**Саломатин Александр Александрович Salomatin Alexander Alexandrovich**

аспирант, младший научный сотрудник graduate student, junior researcher at the Cyber-  
лаборатории «Киберфизических систем» ФГБУН Physical Systems Laboratory of Institute of Control  
«Институт проблем управления им. В.А. Sciences named after V.A. Trapeznikov of Russian  
Трапезникова РАН», Academy of Sciences,  
Российская Федерация, г. Москва. Russian Federation, Moscow.  
E-mail: aleksandr.salomatin@phystech.edu

## К ВОПРОСУ ОБ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУХОСНАБЖЕНИЯ ДОБЫЧНЫХ УЧАСТКОВ ШАХТ

© 2024 Шубников В.С., Завадская Т.В., Борщевский С.В.

---

В статье исследованы и оценены существующие технологии и подходы к управлению воздухообменом на добычных участках шахт, а также предлагаются перспективные направления для их решения с помощью интеллектуальных систем. Основное внимание уделено анализу текущих технологий, выявлению их недостатков, а также предложению новых решений для повышения эффективности, безопасности и экологичности процессов воздухообмена.

**Ключевые слова:** интеллектуальное воздухообмен, горнодобывающая промышленность, автоматизированные системы вентиляции, безопасность шахт, мониторинг качества воздуха, технологии контроля воздуха.

---

**Введение.** При разработке системы воздухообмена добычных участков шахт необходимо уделять основное внимание безопасности труда, поскольку улучшенные системы вентиляции и мониторинга качества воздуха с помощью интеллектуальных технологий могут значительно снизить риски для здоровья и жизни шахтёров. Кроме того, оптимизация использования ресурсов и энергии с использованием автоматизированных систем вентиляции напрямую влияет на экономическую эффективность предприятий, что делает разработку таких систем экономически выгодной.

Цель работы - провести анализ существующих систем и обосновать решения по оптимизации системы воздухообмена для повышения эффективности, безопасности и экологичности эксплуатации шахт.

**Исторический контекст.** Изначально вентиляция в шахтах была примитивной и часто недостаточной, что приводило к многочисленным авариям из-за скопления газов (таких как метан) и пыли, которые могли взорваться. Так основным способом проветривания шахт было использование естественной тяги, создаваемой разницей температур внутри и снаружи шахты. Тёплый воздух внутри шахты поднимался вверх, создавая тягу, которая вытягивала использованный воздух и притягивала свежий из атмосферы.

Также часто использовались два вертикальных ствола — один для входа свежего воздуха, а другой для выхода отработанного. В редких случаях использовались фурнелы — большие огненные камеры, расположенные на дне вентиляционной шахты. Огонь нагревал воздух, который становился легче и быстрее поднимался вверх, создавая тягу, которая притягивала свежий воздух в шахту.

Использование механических вентиляторов в системах воздухообмена началось в 19 веке, но их эффективность была ограничена технологиями того времени. Уже в 20 веке с увеличением глубины шахт и сложности их эксплуатации возросла потребность в более эффективных системах вентиляции. Введение электрических вентиляторов и более сложных систем управления воздушными потоками значительно улучшило ситуацию. А в последние десятилетия внимание уделяется не только подаче свежего воздуха, но и контролю за составом воздушной среды в шахтах. Используются системы мониторинга качества воздуха, автоматизированные системы регулирования воздухопотоков и методы очистки воздуха от вредных примесей.



История знает множество инцидентов, связанных с недостаточной вентиляцией. Например, аварии из-за метановых взрывов в шахтах Кузбасса и Донбасса подчеркивают риски, связанные с газоносными пластами. Эти инциденты привели к ужесточению мер безопасности проведения горных работ и введению новых технологий для контроля газового состава воздуха на шахтах. И только введение таких технологий, как криогенное воздуходобывание и системы кондиционирования воздуха в убежищах шахт, позволило значительно повысить безопасность в чрезвычайных ситуациях, обеспечивая шахтерам доступ к чистому и прохладному воздуху в условиях аварий [1].

**История развития технологий воздуходобывания добычных участков шахт.** История технологий воздуходобывания в шахтах прошла длительный путь развития, основанный на потребностях повышения безопасности добычных участков шахт и операционной эффективности. Так одним из самых ранних методов вентиляции шахт было использование печей в нижней части шахтных стволов, которые нагревали воздух, тем самым облегчая его и вызывая движение вверх. Этот метод оказался дорогостоящим, опасным и неэффективным [2].

К 1920-м годам началось использование цикла компрессионного холодильника в шахтах для охлаждения, что стало началом искусственного кондиционирования воздуха в горнодобывающей промышленности. Значимые реализации включают шахту Morro Velho в Бразилии и британские угольные шахты [3]. В то же время современные шахты используют обширные системы сжатого воздуха для вентиляции, которые потребляют значительную часть электроэнергии шахты. Усилия по оптимизации этих систем с целью повышения энергоэффективности продолжаются, с технологиями, позволяющими динамически контролировать подачу воздуха в зависимости от реальных потребностей [4].

С увеличением глубины горных работ разрабатываются более сложные системы охлаждения и вентиляции. Например, предлагаются холодильные установки с воздушным циклом как более экономичное решение по сравнению с водяными системами для глубоких шахт [5]. А недавние инновации включают технологии для эффективного уплотнения утечек воздуха, которые решают проблемы высокой концентрации пыли и сложности операций в крупных шахтах. Такие технологии не только предотвращают утечку воздуха, но и повышают безопасность и операционную эффективность [6].

**Роль воздуходобывания в шахтах.** Роль воздуходобывания в шахтах является ключевой для обеспечения безопасности и эффективности добычных работ. Так основной задачей системы вентиляции является обеспечение безопасности и здоровья работников. Качество воздуха в шахтах напрямую влияет на здоровье и работоспособность горняков, а недостаточное или избыточное проветривание может привести к образованию вредных концентраций газов, таких как метан или угарный газ, которые могут быть опасными или даже смертельными [7].

Воздуходобывание также играет важную роль в поддержании эффективности работы оборудования. Так воздушное охлаждение и регулирование температуры в глубоких шахтах критически важны для поддержания работоспособности технического оборудования и предотвращения его перегрева. Это также помогает уменьшить воздействие высоких температур на работников [8]. Но системы воздуходобывания в шахтах потребляют значительное количество энергии и поэтому оптимизация их использования и улучшение энергоэффективности могут значительно снизить операционные расходы [1].

Стоит отметить, что продуманное и качественное воздуходобывание критически важно при проектировании убежищ в добычных участках шахт. Так в случае чрезвычайных ситуаций, таких как пожары или обрушения, наличие адекватного воздуходобывания в убежищах может стать решающим фактором для выживания заблокированных под землей рабочих. Системы воздуходобывания должны поддерживать подходящий микроклимат и обеспечивать достаточный уровень кислорода [4].

**Анализ последних исследований и публикаций.** Существует целый ряд работ, посвященных созданию интеллектуальных систем выбора параметров воздуходобывания добычных участков шахт.

Так в работе [9] рассматривается проблема своевременного отслеживания и контроля состояния системы вентиляции для обеспечения подачи достаточного количества воздуха для поддержания приемлемых условий работы. В исследовании предлагается модель раннего предупреждения, состоящая из двух подмоделей, каждая из которых разработана с использованием техник data mining.

В модели оптимального выбора индексов применяется теория грубых множеств (Rough Set theory, RS), чтобы помочь в выборе параметров или показателей, которые наиболее значимы для оценки и управления системой вентиляции в шахтах (производительность, качество воздуха, энергоэффективность и т.д.). А модель оценки рисков, которая основана на машине опорных векторов (Support Vector Machine, SVM), используется для классификации уровней риска системы вентиляции шахты.

В исследовании модель была проверена на примерах использования, что показало её пригодность и подтвердило то, что интегрированная модель может эффективно применяться для оценки и улучшения безопасности систем вентиляции шахт [9].

Исследование [10] посвящено разработке и исследованию архитектуры интеллектуальной системы вентиляции шахт. В работе рассматривается роль системы вентиляции шахт в очистке воздуха и создании благоприятной рабочей среды в угольных шахтах. Данная работа подчеркивает необходимость использования реальных и полных данных мониторинга. В ней принципы нейронауки, машинного обучения и аналитики используются для оперативной корректировки дефектов распределения воздушного потока, автоматической регулировки мощности вентиляционных установок, удаленного управления объектами и точного определения катастроф [10].

В тоже время исследование [1] фокусируется на использовании машинного обучения для оптимизации управления системами вентиляции в шахтах. Сама же вентиляция шахт требует точной регулировки для обеспечения безопасности и эффективности работы. Традиционные методы управления часто не учитывают динамические изменения в шахте, что может привести к неэффективному использованию ресурсов и потенциальным рискам безопасности.

Для разработки и обучения регрессионной модели на основе нейронной сети, которая предсказывает оптимальное положение вентиляционных регуляторов в зависимости от текущих условий в шахте на основе собранной информации о прошлой работе и поведении системы вентиляции для обучения модели.

Модель тестировалась на реальных данных, чтобы проверить её способность адаптироваться к изменениям и обеспечивать надежное управление вентиляцией. И в результате предложенная модель показала способность эффективно управлять положением регуляторов, учитывая изменения в шахтной среде, а также продемонстрировала улучшение энергоэффективности и безопасности по сравнению с традиционными методами управления [1].

**Анализ существующих проблем в воздухообеспечении добычных участков шахт. Неэффективное управление сжатым воздухом.** Системы сжатого воздуха часто работают с избыточным давлением для обеспечения рабочих областей, что приводит к ненужным затратам энергии и увеличению операционных расходов.

Одной из наиболее частых проблем в системах сжатого воздуха являются утечки, которые могут составлять до 20-30% от общего объема воздуха, производимого компрессорами. Это приводит к необходимости увеличения работы компрессорной установки, что увеличивает энергопотребление и износ оборудования, а недостаточное или неправильное обслуживание компрессоров и других элементов системы может привести к снижению их эффективности и, как следствие, к увеличению расходов на энергию и ремонт.

Также отсутствие мониторинга и управления по фактическому спросу на воздух приводит к его перепроизводству, что является не только дорогостоящим, но и неэкологичным.

**Тепловые проблемы и контроль за температурой.** В шахтах, особенно глубоких, проблемы с контролем температуры могут серьезно влиять на здоровье и производительность шахтеров.

При высокой температуре воздуха компрессоры и другие компоненты системы воздухообеспечения могут перегреваться из-за непрерывной работы или недостаточной вентиляции, что может привести к сокращению срока службы оборудования и необходимости частого ремонта или его замены. В тоже время в холодных условиях влага в сжатом воздухе может конденсироваться, что приводит к образованию воды в системе, что может вызвать коррозию, замерзание компонентов в зимний период и повреждение оборудования. Это не говоря о том, что высокая или низкая температура воздуха, подаваемого в рабочие зоны, может сделать условия работы некомфортными или даже опасными, что снижает производительность и увеличивает риск производственных травм.

Температура воздуха напрямую влияет на эффективность работы вентиляторов и систем фильтрации. Высокая температура может уменьшать эффективность фильтрации, в то время как слишком низкая температура может увеличивать вязкость и сопротивление воздуха.

**Недостаточная вентиляция.** Одной из основных проблем вентиляции добычных участков шахт является неадекватность вентиляционных систем, которая приводит к рециркуляции устаревшего воздуха или воздуха с токсичными газами, что увеличивает затраты на вентиляцию и электроэнергию и подвергает работников опасности.

В шахтах с недостаточной вентиляцией может происходить накопление вредных загрязнителей, таких как углекислый газ, летучие органические соединения, пыль и другие частицы. Само же плохое качество воздуха может привести к развитию или усугублению респираторных заболеваний, аллергии и астмы. Кроме того, это может снизить общую производительность и ухудшить концентрацию внимания. А недостаточный воздухообмен часто ведет к повышенной влажности, что способствует росту плесени и грибка.

Высокая влажность и накопление загрязнителей могут также негативно сказаться на электронике и другом оборудовании, ускоряя их износ и увеличивая риск коротких замыканий. Это не только ухудшает условия работы, но и может вызвать дополнительные здоровьесберегающие проблемы.

**Потенциальные решения проблем в воздухообмене. Применение мультиобъективной оптимизации в проектировании систем воздухообмена.** Традиционные методы оптимизации часто фокусируются на одном параметре, например, минимизации затрат. Мультиобъективная оптимизация позволяет рассматривать множество критериев одновременно, таких как минимизация энергопотребления, максимизация эффективности воздухообмена и обеспечение безопасности рабочего пространства. Оптимизационный подход для проектирования интегрированных систем водоснабжения, аналогичных применяемым в горнодобывающей промышленности, может быть адаптирован для воздухообмена.

Так включение различных критериев в процесс проектирования помогает инженерам избегать компромиссов, которые могут негативно сказаться на одном аспекте в ущерб другому. Сами же шахты постоянно развиваются, и системы воздухообмена должны адаптироваться к новым условиям работы. Мультиобъективная оптимизация позволяет создать гибкие системы, способные адаптироваться к изменениям без значительных затрат или перепроектирования.

Мультиобъективная оптимизация может быть использована для определения оптимальных мест расположения вентиляционных установок, чтобы максимизировать покрытие воздухом при минимальных энергетических затратах. Различные типы вентиляторов и фильтров имеют разные характеристики по мощности, эффективности и стоимости и мультиобъективная оптимизация помогает выбирать компоненты, которые лучше всего соответствуют требованиям безопасности и эффективности, с учетом затрат. Также данные системы могут быть настроены так, чтобы автоматически регулировать параметры воздухообмена в зависимости от текущих условий в шахте, таких как уровень загрязнения воздуха, температура и влажность.

Для реализации самой мультиобъективной оптимизации используются различные математические и компьютерные методы, включая генетические алгоритмы, методы принятия решений и программное обеспечение для моделирования, такое как VENTSIM. Эти инструменты позволяют моделировать различные сценарии и автоматически искать оптимальное решение среди множества возможных вариантов.

**Оптимизация вентиляционных систем с помощью программного обеспечения.** Использование специального программного обеспечения для разработки эффективного покрытия, адресации, потока и характеристики вентиляционной сети, что позволит избежать застоя токсичных газов в подземных работах и снизить затраты на вентиляцию.

Программное обеспечение позволяет создавать детальные 3D модели вентиляционных систем шахт, что дает возможность точно анализировать потоки воздуха и определять участки с недостаточной вентиляцией. Это позволяет инженерам вносить коррективы в систему вентиляции, например, изменяя местоположение вентиляторов или регулируя их мощность. Также данные программы позволяют оптимизировать работу вентиляционных установок, минимизируя их энергопотребление при сохранении необходимого уровня воздухообмена, что достигается за счет более точного расчета необходимого объема воздуха и автоматизации процессов управления.

С помощью ПО можно прогнозировать изменения в потребностях системы воздухообмена в зависимости от планируемого развития шахты. Это включает расширение горных работ, изменение глубины шахт или новые технологические процессы.

Также ПО помогает идентифицировать потенциальные риски, связанные с накоплением вредных газов или недостаточной вентиляцией, что может привести к аварийным ситуациям. Системы могут автоматически регулировать параметры вентиляции для обеспечения безопасного рабочего микроклимата. Также стоит отметить, что современное программное обеспечение обладает возможностями визуализации, которые делают данные о вентиляции наглядными для инженеров и управляющего персонала.

В исследовании [11] разработано универсальное программное обеспечение для симуляции и оптимизации вентиляционных систем шахт. Оно решает проблемы управления информацией о вентиляции шахты, автоматического отображения 3D вентиляционных стереограмм, автоматического расчета сети вентиляции и автоматической записи параметров вентиляционной сети [11].

**Использование данных 3D лазерного сканирования для анализа потоков воздуха.** Применение данных, собранных с помощью технологии LiDAR или наземных лазерных сканеров, для генерации 3D моделей геометрии подземных структур и их дальнейшего использования в численных симуляциях потоков воздуха с использованием вычислительной гидродинамики.

Использование 3D моделей, созданных на основе данных лазерного сканирования, позволяет проводить более точные численные симуляции воздушных потоков. Это особенно важно в сложных вентиляционных сетях, где могут возникать помехи в векторах скорости воздуха из-за внезапных изменений в геометрии.

Само же 3D лазерное сканирование даёт более точные модели позволяют лучше понимать и оптимизировать распределение воздушных потоков, что способствует повышению безопасности и эффективности вентиляционных систем.

Точные данные 3D сканирования и анализ помогают в проведении необходимых корректировок в системе вентиляции, что может привести к снижению операционных затрат и улучшению рабочей среды. А сами модели позволяют анализировать локальные феномены воздушных потоков, что критически важно для предотвращения аварийных ситуаций, связанных с вентиляцией.

**Выводы.** Основные проблемы с системами воздухообмена в шахтах являются неэффективное распределение воздуха, высокое энергопотребление, проблемы с качеством воздуха, а также стохастические явления.

Интеллектуальные системы могут анализировать большие объемы данных в реальном времени, что позволяет предсказывать и определять вероятные точки и условия для возникновения стохастических событий, таких как выбросы метана. С использованием датчиков, способных фиксировать концентрацию метана и других газов, система может оперативно реагировать, адаптируя параметры вентиляции для предотвращения возможных взрывов или других опасных ситуаций.

Внедрение современных технологий, таких как программное обеспечение для моделирования вентиляции, методы мультиобъективной оптимизации и использование 3D лазерного сканирования для анализа вентиляционных сетей, способствует улучшению управления воздухообменом и повышению эффективности систем, что также приводит к уменьшению отрицательного экологического воздействия на окружающую среду.

Интеграция интеллектуальных систем в управление воздухообменом открывает новые возможности для автоматизации и улучшения рабочих условий в шахтах.

Дальнейшие исследования в области разработки интеллектуальных систем выбора параметров воздухообмена добычных участков шахт открывают множество перспективных направлений

Использование алгоритмов глубокого обучения для анализа данных в реальном времени и предсказания потенциальных рисков событий, таких как взрывы газа или аварии, что включает в себя разработку моделей, способных предсказывать изменения в газовом составе шахты и автоматически адаптировать систему вентиляции для минимизации рисков. А создание и внедрение более чувствительных и точных датчиков для мониторинга качества воздуха и параметров вентиляции в шахте позволит собирать данные о температуре, влажности, уровнях газов и других важных параметрах в более широком диапазоне условий.

Также среди перспективных направлений исследований является интеграция интеллектуальных систем вентиляции с другими системами безопасности шахты, такими как системы видеонаблюдения, системы контроля доступа и системы управления аварийными ситуациями, для создания комплексной системы безопасности.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Underground Mine Refuge Alternatives Heat Mitigation / L. Yan, D. Yantek, T. Lutz [et al.] // Journal of Thermal Science and Engineering Applications. – 2019. – V. 12(1). – DOI 10.1115/1.4044345.
2. Daniel, W. On Mechanical Ventilators for Mines / W. Daniel // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. – 1875. – V. 26 (1). – P. 317-333. – DOI 10.1243/PIME\_PROC\_1875\_026\_023\_02.
3. Mcpherson, M. Refrigeration plant and mine air conditioning systems / M. Mcpherson. – Springer, Dordrecht, 1993. – P 651-738. – DOI 10.1007/978-94-011-1550-6\_18.
4. Optimization of the compressed air-usage in South African mines / A. Hassan, K. Ouahada, T. Marwala, B. Twala // In IEEE Africon '11. – Victoria Falls, Zambia, 2011. – DOI 10.1109/AFRCON.2011.6072145.
5. Castillo, D. Air cycle refrigeration system for cooling deep mines / D. Castillo // International Journal of Refrigeration-revue Internationale Du Froid. – 1988. – V. 11(2). – P. 87-91. – DOI 10.1016/0140-7007(88)90118-1.
6. Shao, S. A novel coating technology for fast sealing of air leakage in underground coal mines / S. Shao, C. Wu, M. Hao [et al.] // International journal of mining science and technology. – 2020. – V. 31(2). – P. 313-320. – DOI 10.1016/j.ijmst.2020.08.004.
7. Improving Air Quality for Operators of Mobile Machines in Underground Mines / A. Szczurek, M. Maciejewska, M. Przybyła, W. Szetelnicki // Atmosphere. – 2020. – V. 11(12):1372. – DOI 10.3390/atmos11121372.
8. Кормщиков, Д. С. Безопасность реверсирования воздушного потока в вентиляционных стволах шахт в холодное время года при отсутствии подогрева / Д. С. Кормщиков, Е. Г. Кузьминых, М. А. Семин // Безопасность труда в промышленности. – 2022. – № 1. – С. 14-19. – DOI 10.24000/0409-2961-2022-1-14-19. – EDN RHSOAM.
9. Cheng, J. Data mining applications in evaluating mine ventilation system / J. Cheng, S. Yang // Safety Science. – 2012. – V. 50 (4). – P. 918-922.
10. Huang, X. Research and design of intelligent mine ventilation construction architecture / X. Huang, Y. Liu // International Journal of Low-Carbon Technologies. – 2022. – V. 17. – P. 1232–1238.
11. Yun, S. Study and Application on Simulation and Optimization System for the Mine Ventilation Network / S. Yun, W. Hai-ning // Procedia Engineering. – 2011. – V. 26. – P. 236-242

*Поступила в редакцию 06.07.2024 г., рекомендована к печати 20.08.2024 г.*

INTELLIGENT SYSTEM FOR SELECTING AIR SUPPLY PARAMETERS  
FOR MINING AREAS OF A MINE

*SHubnikov V.S., Zavadskaja T.V., Borshchevskii S.V.*

The article examines and evaluates existing technologies and approaches to managing air supply in mining areas of mines, and also proposes promising directions for solving them using intelligent systems. The main focus is on analyzing current technologies, identifying their shortcomings, as well as proposing new solutions to improve the efficiency, safety and environmental friendliness of air supply processes.

**Keywords:** smart air supply, mining industry, automated ventilation systems, mine safety, air quality monitoring, air control technologies.

**Шубников Валентин Сергеевич**

ассистент кафедры компьютерной инженерии  
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный  
технический университет»,  
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: yetanotheruselessmailv99-27-4@mail.ru

**SHubnikov Valentin Sergeevich**

Assistant at Department of Computer Engineering of  
Donetsk National Technical University,  
Russian Federation, DPR, Donetsk.

**Завадская Татьяна Владимировна**

кандидат технических наук, доцент, доцент  
кафедры компьютерной инженерии ФГБОУ ВО  
«Донецкий национальный технический  
университет»,  
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: tatyana.zavadskaja@gmail.com

**Zavadskaja Tatiana Vladimirovna**

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

**Борщевский Сергей Васильевич**

доктор технических наук, профессор, проректор  
(по научной работе) ФГБОУ ВО «Донецкий  
национальный технический университет»,  
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: borshevskiy@mail.ru

**Borshchevskii Sergei Vasilevich**

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Vice-  
Rector (of Scientific Work) of Donetsk National  
Technical University,  
Russian Federation, DPR, Donetsk.

## МУЛЬТИДОМЕННЫЙ АНАЛИЗ ВИБРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ДОРОЖНОГО КАТКА ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УПЛОТНЕННОСТИ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ

© 2024 Прокопьев А.П.

---

Приведено исследование переменной ускорения колебаний рабочего органа катка для построения автоматизированной системы контроля уплотненности асфальтобетонной смеси на базе технологии вычислительного интеллекта. Исследование базируется на анализе данных вибрационных параметров вальца дорожного катка во временной и частотной областях. Вибрационные сигналы получены с помощью MEMS акселерометра, установленного на вибрационном вальце катка, во время проведения полевого экспериментального исследования. В процессе строительства верхнего слоя покрытия автомобильной дороги измерялись режимные параметры дорожного катка, а также вибропараметры вальца. Исследование на базе мультидоменного анализа позволило обосновать возможность применения для построения интеллектуальной системы контроля плотности асфальтобетонной смеси в процессе уплотнения катком показателей только во временной области – максимального абсолютного значения ускорения и среднеквадратичного значения ускорения вибрационного вальца.

**Ключевые слова:** автоматизация, интеллектуальная, контроль плотности, мультидоменный анализ, асфальтобетонная смесь, вибрационный каток.

---

**Введение.** Повышение качества и увеличение срока службы асфальтобетонных (АБ) покрытий автомобильных дорог зависит от эффективности уплотнения смеси во время строительства рабочими органами асфальтоукладчика (АУ) и дорожных катков (ДК) разных типов: легкого; среднего; тяжелого. Дорожные катки рекомендуется использовать всегда, даже если АУ с высокоэффективным рабочим органом обеспечивает требуемую нормативную плотность АБ смеси. Каток тяжелого типа статический или вибрационный нужен для закрепления объемной плотности АБ смеси и повышения структурной прочности асфальтобетона [1].

Контроль качества уплотнения имеет решающее значение для строительства автомобильных дорог и объектов транспортной инфраструктуры. Традиционный контроль качества уплотнения основан на «точечных» измерениях плотности. Для автоматизации ДК используются системы контроля качества уплотнения реализующие неразрушающие технологии «интеллектуального уплотнения» (англ. Intelligent Compaction, IC) и «непрерывного контроля уплотнения» (англ. Continuous Compaction Control, CCC) [2-4].

Физический смысл технологии IC/CCC заключается в наличии функциональной зависимости степени уплотнения дорожного материала от его жесткости. Изменение жесткости материала оценивается по амплитудам и частотам гармонических колебаний вибрационного вальца.

Экспериментальные исследования систем IC/CCC с использованием комплектов приборов, выпускаемых компаниями TOPCON, TRIMBLE, и другие, во многих случаях показали низкие показатели достоверности  $R^2 < 0,2$  зависимостей показателей интеллектуального уплотнения (англ. ICMVs) от степени уплотнения, измеренной с помощью портативных приборов плотномеров разных типов [5-7]. Исследования этих систем продолжаются во многих странах.



Усовершенствованием базовой концепции технологий IC / CCC является использование технологий искусственного интеллекта (ИИ) [2]. Проведенные исследования в этом научном направлении [8, 9] показали необходимость как теоретических, так и экспериментальных работ с целью повышения эффективности прогнозирования показателей качества уплотнения и использования потенциала ИИ. Ученые проявляют большой интерес по накоплению больших данных на основе экспериментов в полевых условиях строительства дорожных покрытий автомобильных дорог.

Цель работы: исследовать переменную ускорения колебаний вибрационного вальца дорожного катка для построения интеллектуальной системы контроля плотностью АБ смеси на основе данных переменных, полученных в полевом эксперименте.

Задачи исследования для достижения поставленной цели.

1. Выполнить предобработку и анализ данных вибрационных сигналов, измеренных во время проведения полевого экспериментального исследования.
2. Провести анализ данных переменных показателей во временной и частотной областях на основе экспериментальных данных переменных вибропараметров.
3. Обосновать показатели для построения интеллектуальной системы контроля качества уплотнения АБ смеси.

**Материал и методы исследования.** Многие современные экспериментальные исследования стали проводить в полевых условиях дорожного строительства [10, 11]. Данные таких экспериментов позволяют проверить научные концепции, результаты теоретических и лабораторных исследований.

Автор статьи с группой исследователей СФУ провел экспериментальное исследование в сентябре 2021 г. на объекте строительства верхнего слоя АБ покрытия автомобильной дороги толщиной 0,05 м в пригороде г. Красноярска, на выезде из пос. Элиты, направление Элита – Арейское - ст. Кача (на участках с 16,5 по 17,5 км) [10]. Использовалась АБ смесь типа А марки I для плотного асфальтобетона по ГОСТ 9128-2013 «Смеси асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия». Измерялось вертикальное ускорение вибрационного вальца катка DM-07-DV среднего типа непрерывно в процессе уплотнения АБ смеси на каждом проходе.

Алгоритм обработки результатов состоит из следующих шагов.

Шаг 1. Анализ вибрационных сигналов колебания вальца ДК.

Шаг 2. На основе анализа полученных временных осциллограмм изменения ускорения вибрационного вальца ДК определить и проанализировать показатели во временной области – максимальное абсолютное значение и среднеквадратичное значение ускорения вибрационного вальца.

Шаг 3. На основе спектрального анализа сигналов акселерометра – алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ), определить показатели интеллектуального уплотнения ICMVs – CMV, CCV, THD, AICV, ICV, MFD, в частотной области, провести статистический анализ.

Шаг 4. Обосновать переменные для построения интеллектуальной системы контроля качества уплотнения для ДК.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Экспериментальная временная осциллограмма ускорений колебаний вибровальца катка DM-07-DV приведена на рис. 1. Коэффициент уплотнения смеси до уплотнения катком в среднем составлял 0,94.

На осциллограмме, см. рис. 1, наблюдается постепенное увеличение амплитудных пиков ускорения от прохода к проходу ДК по мере роста плотности АБ смеси при вибрационном уплотнении. В статических проходах ДК DM-07-DV акселерометром фиксируется наличие ускорения, которое является результатом колебания дизельного двигателя ДК, которое передается на вальцы через раму.

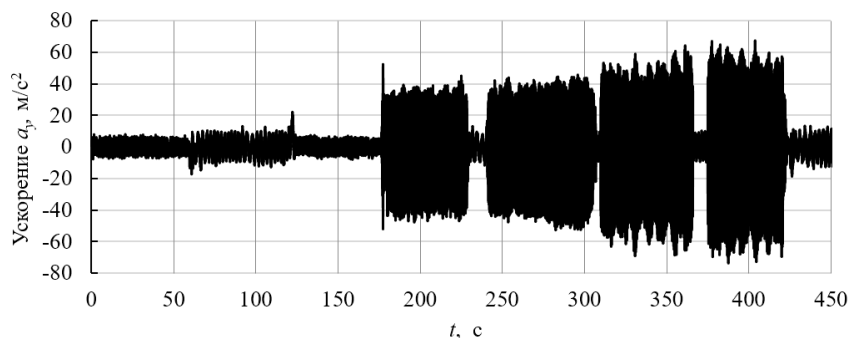


Рис. 1. Экспериментальная осциллограмма ускорений колебания вальца катка DM-07-DV во время полевого исследования

На графике (рис. 1), присутствуют характерные зоны:

- три прохода катка в статическом режиме (интервал времени от 0 до 175 с);
- четвертый проход катка с вибрацией (от 175 до 230 с);
- пятый проход катка с вибрацией (от 240 до 310 с);
- шестой проход катка с вибрацией (от 320 до 370 с);
- седьмой проход катка с вибрацией (от 375 до 425 с).

Характер осциллограммы сигналов ускорения показывает на наличие периодического отрыва вальца от материала, что способствует увеличению плотности слоя АБ смеси и повышению несущей способности покрытия автомобильной дороги. Наблюдается постепенное увеличение пиков ускорения вальца на каждом проходе дорожного катка. Это происходит из-за постепенного увеличения плотности АБ смеси, роста сопротивления смеси деформированию, уменьшения поглощения материалом энергии уплотнения, изменения свойств упруго-вязко-пластичной смеси при ее охлаждении с  $130 \div 135^{\circ}\text{C}$  после первого статического прохода ДК, до  $100 \div 110^{\circ}\text{C}$  после седьмого вибрационного прохода ДК.

Установлена взаимосвязь между ускорением вальца и степенью уплотнения АБ смеси верхнего слоя дорожного покрытия после каждого прохода ДК (рис. 2).

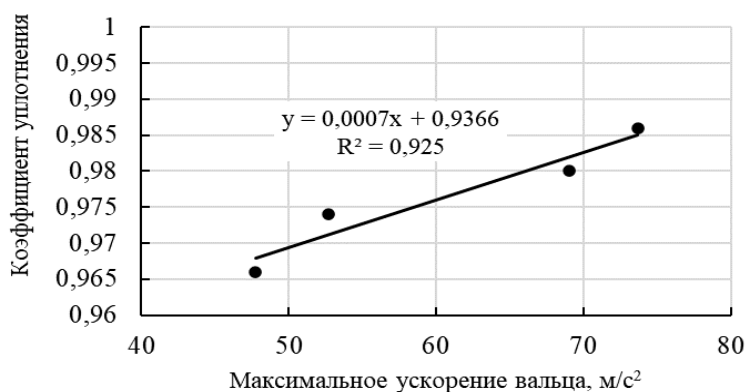


Рис. 2. Зависимость коэффициента уплотнения от максимального значения вертикального ускорения вальца катка DM-07-DV в процессе уплотнения АБ смеси

Зависимость на рис. 2 иллюстрирует хорошее соответствие функции изменения степени уплотнения смеси вызванного ускорением вибрационного вальца в процессе уплотнения, учитывая постепенное уменьшение поглощения энергии уплотнения с ростом плотности АБ смеси.

Мультидоменный анализ экспериментальных данных переменных процесса уплотнения АБ смеси вибрационным катком включает построение и исследование зависимостей переменных факторов во временной и частотной областях.

**Показатели для анализа во временной области.** Используются показатели, зависящие от времени: максимальное абсолютное значение (МАЗ) ускорения  $a_p$ ; среднеквадратичное значение (СКЗ) ускорения вибрационного вальца  $a_{rms}$ . Максимальное абсолютное значение ускорения  $a_p$  описывает изменение амплитуды сигнала ускорения вибрационного вальца ДК:

$$a_p = \max \{ |a_{zi}| \} \quad (i = 1, 2, \dots, n) ,$$

где  $a_{zi}$  – случайно измеренное вертикальное (ось Z) значение ускорения вибрационного вальца ДК, м/с<sup>2</sup>;  $n$  – количество собранных образцов за период.

Среднеквадратичное значение ускорения вибрационного вальца  $a_{rms}$  отражает эффективность ускорения элементов рабочего органа ДК в процессе уплотнения:

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_{zi}^2} = \sqrt{\frac{a_{z1}^2 + a_{z2}^2 + \dots + a_{zn}^2}{n}} .$$

Анализ данных во временной области. Для обоснования выбора интервала времени измерения сигнала ускорения проведен анализ данных переменных в диапазоне от 0,5 с до 6 с. В результате анализа методом математической статистики расчетных показателей  $a_p$  и  $a_{rms}$  по силе влияния (коэффициент корреляции) номера прохода катка и достоверности аппроксимации (коэффициент детерминации  $R^2$ ) линейной модели показателей  $a_p$  и  $a_{rms}$  в функции от номера прохода дорожного катка получены данные представленные в табл. 1.

Таблица 1. Статистические показатели измеренных сигналов и моделей

Период времени измеренного сигнала, с	Коэффициент корреляции переменных с номером прохода ДК		Коэффициент детерминации линейной модели	
	$a_{rms}$	$a_p$	$a_{rms}$	$a_p$
0,5	0,867	0,836	0,752	0,697
1	0,876	0,847	0,768	0,718
1,5	0,885	0,856	0,780	0,733
2	0,894	0,865	0,800	0,748
3	0,889	0,879	0,790	0,770
6	0,802	0,905	0,640	0,820

Лучшие статистические показатели получены для периода измерения сигнала продолжительностью 2 с. Для этого периода измеренных сигналов построены зависимости МАЗ ускорения  $a_p$  (рис. 3) и СКЗ ускорения  $a_{rms}$  (рис. 4) от номера прохода ДК. Коэффициенты корреляции, см. табл. 2, показывают на наличие высокой тесноты связи между переменными по шкале Чеддока.

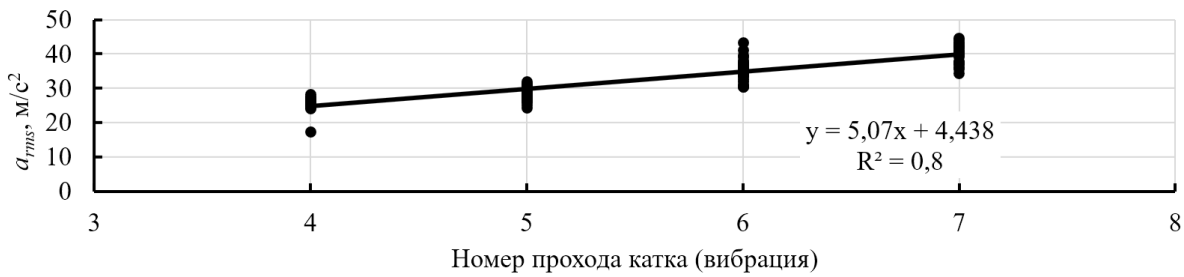


Рис. 3. Зависимость СКЗ ускорения вибрационного вальца ДК DM-07-DV от номера прохода

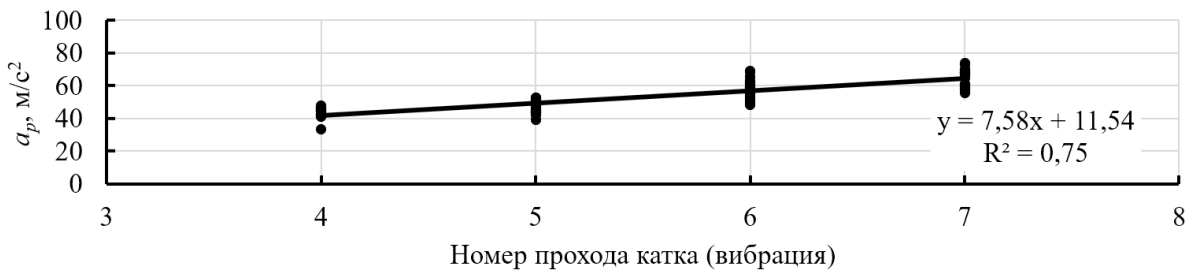


Рис. 4. Зависимость МА3 ускорения вибрационного вальца ДК DM-07-DV от номера прохода

Достоверность аппроксимации  $R^2$  регрессионных линейных зависимостей для всех показателей находятся в диапазоне от 0,75 до 0,80. Уравнениями регрессии объясняется от 75% до 80% дисперсии результативных признаков показателей  $a_p$  и  $a_{rms}$ , на долю прочих факторов – от 25% до 20% их дисперсии.

Таблица 2. Корреляция данных переменных и достоверность аппроксимации

Показатель (временная область)	Коэффициент корреляции показателя с номером прохода катка	$R^2$ линейной модели от номера прохода
$a_{rms}$	0,89	0,80
$a_p$	0,86	0,75

**Показатели для анализа в частотной области.** Для анализа в частотной области использованы показатели, применяемые в технологии интеллектуального уплотнения. Показатели ICMVs рассмотрены в работах [5, 6, 12]. Для исследования приняты следующие показатели ICMVs: CMV; CCV; THD; AICV; ICV; MFD:

$$CMV = 300 \cdot \frac{A_{2f}}{A_f},$$

$$CCV = 100 \cdot \frac{A_{0,5f} + A_{1,5f} + A_{2f} + A_{2,5f} + A_{3f} + A_{3,5f} + A_{4f} + A_{4,5f} + A_{5f}}{A_f + A_{0,5f}},$$

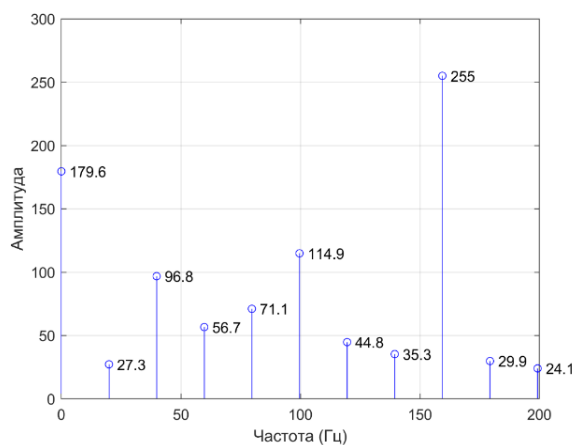
$$THD = 300 \cdot \frac{\sqrt{A_{2f}^2 + A_{3f}^2 + \dots + A_{nf}^2}}{A_f}, \quad AICV = 300 \cdot \frac{A_{2f} + A_{3f}}{A_f},$$

$$ICV = 100 \cdot \frac{A_{2f} + A_{3f} + A_{4f}}{A_f}, MFD = 100 \cdot \frac{\sqrt{\sum_{i=0} (A_{if}^2) - A_f^2}}{A_f}, i = 0,5;1;1,5;2;2,5;3,$$

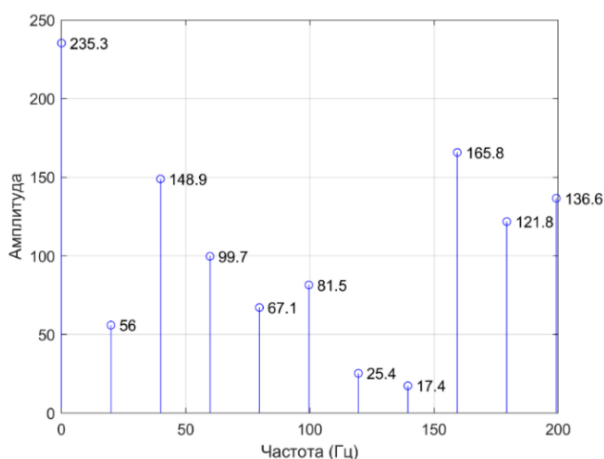
где  $A_{0.5f}$  – амплитуда вертикального ускорения вальца на первой субгармонике;  $A_f$  – амплитуда вертикального ускорения вальца на фундаментальной частоте вибрации;  $A_{1.5f}, A_{2f}, A_{2.5f}, A_{3f}, A_{3.5f}, A_{4f}, A_{4.5f}, A_{5f}$  – амплитуда вертикального ускорения вальца на гармониках высокого порядка соответственно.

В программной среде MATLAB реализован алгоритм БПФ для спектрального анализа измеренных сигналов вертикального ускорения вибрационного вальца ДК DM-07-DV. Используются реальные измеренные сигналы длительностью 1 с.

Анализ данных в частотной области. Построены графики спектров сигналов для четвертого – седьмого проходов двухвальцового ДК DM-07-DV в режиме вибрационного уплотнения. На рис. 5 приведены графики для 4-го и 7-го проходов.



а)



б)

Рис. 5. График спектра сигнала вертикального ускорения в процессе:  
а) 4-го прохода; б) 7-го прохода

Построены графики зависимостей показателей ICMVs от номера прохода ДК, см рис. 6 ÷ 11. Построенные зависимости показателей ICMVs от номера прохода ДК DM-07-DV имеют очень маленькие значения коэффициентов детерминации линейных моделей  $R^2$  – от  $1 \cdot 10^{-6}$  для показателя *THD* до 0,0046 для *CCV*. Это объясняется тем, что свойства, характеристики дорожного материала и основания: температура АБ смеси; толщина слоя; уклон местности; объемная плотность; жесткость основания; и др., постоянно изменяются. Это влияет на погрешности измерений переменных вибропараметров процесса уплотнения АБ смеси ДК.

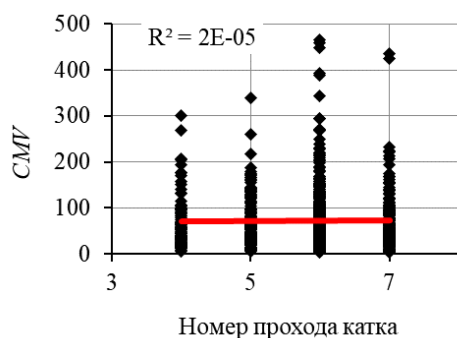


Рис. 6. Зависимость показателя *CMV* от номера прохода катка

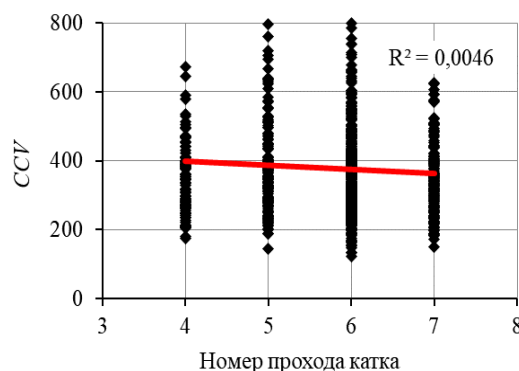


Рис. 7. Зависимость показателя *CCV* от номера прохода катка

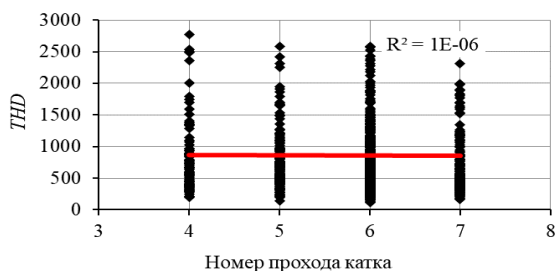


Рис. 8. Зависимость показателя *THD* от номера прохода катка

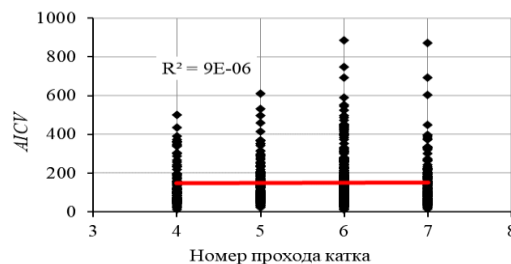


Рис. 9. Зависимость показателя *AICV* от номера прохода катка

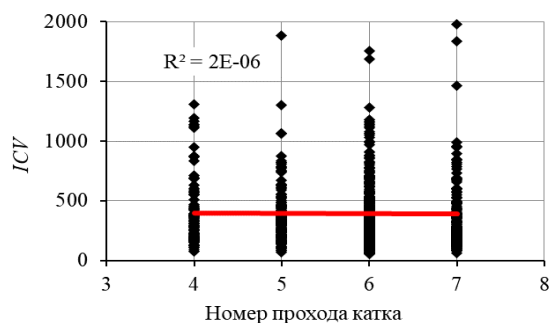


Рис. 10. Зависимость показателя *ICV* от номера прохода катка

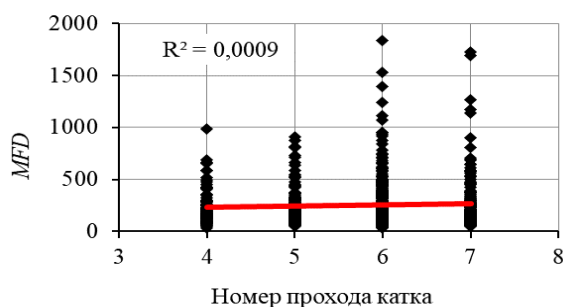


Рис. 11. Зависимость показателя *MFD* от номера прохода катка

Аналогичные результаты экспериментальных исследований, проведенных в различных штатах США с использованием показателей ICMVs, показали значительное превышение доли необъяснённой дисперсии (больше 80%) в дисперсии зависимой переменной [5, 6].

**Выводы.** Исследование на основе мультидоменного анализа позволило оценить возможность применения данных переменных ускорения колебания вальца ДК для построения автоматизированной системы контроля уплотненности АБ смеси на базе технологии вычислительного интеллекта.

Построение интеллектуальной САК плотности для вибрационных катков, учитывая неудовлетворительную корреляцию и достоверность моделей регрессии показателей ICMVs полученных в частотной области, построенных на базе полевых экспериментальных данных переменных, можно выполнить на основе показателей во временной области – МАЗ ускорения  $a_p$  и СКЗ ускорения вибрационного вальца  $a_{rms}$ . Достоверность аппроксимации  $R^2$  регрессионных зависимостей этих показателей находятся в диапазоне от 0,75 до 0,80. Уравнениями регрессии (факторы частота вибрационного вальца и коэффициент уплотнения) объясняется от 75% до 80% дисперсии результативных признаков показателей  $a_p$  и  $a_{rms}$ , на долю прочих факторов приходится от 20% до 25% их дисперсии. Коэффициенты корреляции показателей  $a_p$  и  $a_{rms}$  с частотой вибрационного вальца и коэффициентом уплотнения АБ смеси по шкале Чеддока соответствуют высокой тесноте связи.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Костельов, М. П. Как правильно выбрать и настроить асфальтоукладчик / М. П. Костельов, Д. В. Пахаренко, З. К. Бринкс // Дорожная техника: кат.-справ. – 2007. – Вып. 70. – С. 12-23.
2. The pioneer of intelligent construction – An overview of the development of intelligent compaction / G. Xu, G. K. Chang, D. Wang [et al.] // Journal of Road Engineering. – 2022. – V. 2. – P. 348–356. – DOI 10.1016/j.jreng.2022.12.001.
3. Xu, Y. Review of applications of artificial intelligence algorithms in pavement management / Y. Xu, Z. Zhang // Journal of Transportation Engineering Part B-Pavements. – 2022. – V. 148 (3). – DOI 10.1061/jpeodx.0000373.
4. A state-of-the-art review of asphalt pavement surface texture and its measurement techniques / S. Chen, X. Liu, H. Luo [et al.] // Journal of Road Engineering. – 2022. – V. 2 (2). – P. 156–180.
5. A state-of-the-art review of compaction control test methods and intelligent compaction technology for asphalt pavements / S. Sivagnanasuntharam, A. Sountharajah, J. Ghorbani [et al.] // Road Materials and Pavement Design. – 2021. – V. 24(1). – P. 1–30. – DOI 10.1080/14680629.2021.2015423.
6. Sivagnanasuntharam, S. In-situ spot test measurements and ICMVs for asphalt pavement: lack of correlations and the effect of underlying support / S. Sivagnanasuntharam, A. Sountharajah, J. Kodikara // International Journal of Pavement Engineering. – 2023. – V. 24 (1). – URL: <https://doi.org/10.1080/10298436.2023.2198770>.
7. Foroutan, M. Evaluation of correlations between intelligent compaction measurement values and in situ spot measurements / M. Foroutan, K. C. Bijay, E. Ghazanfari // Geo-Congress. – 2020. – P. 602–611.
8. Artificial Neural Network–Based Intelligent Compaction Analyzer for Real-Time Estimation of Subgrade Quality / A.S. Imran, M. Barman, S. Commuri [et al.] // International Journal of Geomechanics. – 2018. – № 18 (6). – DOI 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001089.
9. Artificial Neural Network-Based Method for Real-Time Estimation of Compaction Quality of Hot Asphalt Mixes / Z. Xue, W. Cao, S. Liu [et al.] // Appl. Sci. – 2021. – V. 11. – P. 7136. – DOI 10.3390/app11157136.
10. Полевое исследование процесса укладки асфальтобетонной смеси с компонентами автоматизации технологии неразрушающего контроля уплотнения / А. П. Прокопьев, Р. Т. Емельянов, А. С. Янаев [и др.] // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 2(86). – С. 292-299. – EDN QICSSA.
11. Recent Development in Intelligent Compaction for Asphalt Pavement Construction: Leveraging Smart Sensors and Machine Learning / Y. Wang, J. Li, X. Zhang [et al.] // Sensors. – 2024. – V. 24. – P. 2777. – DOI 10.3390/s24092777.
12. Yao, Y. Intelligent compaction methods and quality control / Y. Yao, E. Song // Smart Construction and Sustainable Cities. – 2023. – V. 1 (2). – DOI 10.1007/s44268-023-00004-4.

*Поступила в редакцию 09.08.2024 г., рекомендована к печати 09.09.2024 г.*

**MULTI-DOMAIN ANALYSIS OF A ROLLER VIBROPARAMETERS FOR  
AUTOMATED PREDICT OF COMPACTNESS ASPHALT CONCRETE MIXTURE**

*Prokopen A.P.*

A study of the variable acceleration of the roller working body vibrations for the construction of an automated system for monitoring of the asphalt concrete mixture density based on computational intelligence technology is presented. The study is based on the analysis of data on the vibration parameters of the road roller drum in the time and frequency domains. Vibration signals were obtained using a MEMS accelerometer mounted on the roller's vibrating drum during a field experimental study. During the construction of the upper layer of the road pavement, the operating parameters of the roller, as well as the vibration parameters of the drum, were measured. The study based on multi-domain analysis made it possible to substantiate the possibility of using indicators only in the time domain - the maximum absolute value of acceleration and the root mean square value of acceleration of the roller's vibrating drum.

**Keywords:** automation, intelligent, density control, multi-domain analysis, asphalt mixture, vibrating roller.

**Прокопьев Андрей Петрович**

кандидат технических наук, доцент, доцент  
кафедры строительных материалов и технологии  
строительства ФГАОУ ВО «Сибирский  
федеральный университет»,  
Российская Федерация, г. Красноярск.  
E-mail: prok1@yandex.ru

**Prokopen Andrei Petrovich**

Candidate of Technical Sciences, Associate  
Professor, Associate Professor at building materials  
and construction technology of Siberian Federal  
University,  
Russian Federation, Krasnoyarsk.



## ПОДХОД К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ КАНАЛА СВЯЗИ

© 2024 *Чепцов М.Н., Климов В.В.*

---

Настоящая работа направлена на анализ существующих и разработку нового подхода к прогнозированию пропускной способности канала связи, основанном на учете фрактальных свойств трафика данных. Так, предложенный подход использует ARFIMA-модель, что позволяет повысить точность прогнозирования пропускной способности с учетом заданных параметров качества обслуживания. Также в статье предложен метод оценки пропускной способности канала связи, учитывающий фрактальные свойства поступающего трафика при обеспечении заданных параметров качества обслуживания.

**Ключевые слова:** прогнозирование, пропускная способность, канал связи, ARFIMA-модель, точность прогнозирования, фрактальные свойства, параметры качества обслуживания.

---

**Введение.** Для эффективной работы сети передачи данных следует придерживаться таких правил как: обеспечение заданных параметров качества обслуживания (для пользователя), эффективного использования имеющихся сетевых ресурсов (для оператора). И, если параметры качества обслуживания (QoS, Quality of Service), регламентированы, то критерии эффективности использования ресурсов являются величинами, которые оператору хотелось бы получить. Это связано с тем, что параметры работы сети передачи данных достаточно изменчивы и зависят от большого количества составляющих, таких как скорость обработки информации на сетевых устройствах, объем трафика, поступающего в линию связи, количество сетевых устройств в целом. Исходя из этого, исследователи выделяют наиболее существенный параметр определенной задачи управления сетью передачи данных и находят методы его оценки. В настоящей работе таким параметром является пропускная способность каналов связи сети передачи данных.

Особенностью прогнозирования пропускной способности является ее зависимость от параметров и характера поступающего трафика. При этом необходимо выполнять требования по обеспечению параметров качества обслуживания. Существующие подходы прогнозирования позволяют учитывать либо тип поступающего трафика, либо возможность обеспечения параметров качества обслуживания. Следовательно, целью статьи является анализ и разработка подхода к прогнозированию пропускной способности канала связи, который основан на учете фрактальных свойствах трафика данных при обеспечении заданных параметров качества обслуживания.

**Постановка задачи.** Анализ состава и свойств трафика данных посвящено достаточно научно-исследовательских работ. К основополагающим можно отнести работу [1], в которой доказано, что характер трафика данных – самоподобный, обладающей долгосрочной либо краткосрочной памятью. Несмотря на все исследования, единой универсальной модели трафика данных не существует. В работе [2] приведен обзор моделей фрактальных точечных процессов таких как: фрактальный ON/OFF источник, фрактальный дробовый точечный процесс, фрактальный биномиальный процесс. Все перечисленные модели позволяют прогнозировать трафик с определенной точностью, которой в современных реалиях высокоскоростной передачи данных оказывается недостаточной.

Согласно работам [3, 4] в общем виде прогностическая модель трафика выглядит следующим образом:

$$\Lambda(t) = Tr(t) + Sn(t) + Cl(t) + \varepsilon(t),$$

где  $Tr(t)$  – тренд, который представляет собой плавно изменяющуюся составляющую;

$Sn(t)$  – сезонная составляющая;

$Cl(t)$  – циклическая составляющая;

$\varepsilon(t)$  – случайная составляющая.

Тренд, сезонная и циклическая составляющие обычно определяются с помощью подходов статистического анализа. Динамический характер трафика формируется случайной составляющей, прогнозирования которой и вызывает определенные трудности. Кроме того, случайная составляющая «отвечает» за динамичность поведения трафика данных. Для упрощения процесса прогнозирования, в качестве описательных моделей случайной составляющей наиболее часто используются распределения Парето, Вейбулла и логнормальное [5].

Рассмотрим следующие условия для прогнозирования пропускной способности. Для целей прогнозирования определим следующие параметры: величина прогнозируемой пропускной способности ( $y(\Delta\tau)$ ); частота, с которой фиксируются значения трафика, далее статистический интервал ( $\Delta t$ ); время, необходимое для проверки точности прогноза ( $\Delta\tau$ ), далее уточняющий интервал. Алгоритм решает следующую задачу: для некоторого потока трафика  $tr(i)$ , определенного в  $i$ -е временные отсчеты, в которых производилась оценка трафика. Необходимо спрогнозировать пропускную способность ( $y(\Delta\tau)$ ), с учетом параметров качества обслуживания. Для дальнейшей работы с наборами значений трафика их необходимо обработать следующим образом:

$$c(i\Delta t) = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n \lambda((i(n-1)+l)\Delta t), \quad (1)$$

где  $c_j(n)$  – оценка интенсивности потока трафика на  $i$ -м исходном наборе;

$n$  – число измерений трафика за статистический интервал  $\Delta t$ ;

$\lambda(i)$  – мгновенная интенсивность трафика в момент времени.

Прогнозируемое значение пропускной способности формируется, исходя из максимальных значений оценок интенсивностей в пределах уточняющего интервала:

$$y(m\Delta\tau) = \max_{i=1..k} (c(m(k-1)+i)\Delta t), \quad (2)$$

где  $k$  – количество статистических интервалов в одном уточняющем интервале;

$m$  – номер уточняющего интервала.

Полученные значения являются значениями пропускной способности потока трафика на следующий уточняющий интервал, при выполнении следующих условий:

$$y(m\Delta\tau), \quad y(m\Delta\tau) > y((m-1)\Delta\tau), \quad (3)$$

$$y((m-1)\Delta\tau), \quad y(m\Delta\tau) \leq y((m-1)\Delta\tau), \quad (4)$$

$$P \leq P_{QoS}, \quad ac \rightarrow 1, \quad (5)$$

где  $P$  – доля потерь трафика;

$P_{QoS}$  – доля потерь трафика, согласно требованиям к качеству обслуживания;

$ac$  – оценка точности прогнозирования пропускной способности.

При этом должно выполняться условие отсутствия перегрузок в физическом канале:

$$\sum_{j=1}^N y_j(m\Delta\tau) < C, \quad (6)$$

где  $C$  – пропускная способность физического канала;

$N$  – количество виртуальных каналов с заданной пропускной способностью, в одном физическом.

Значения  $y_j(m\Delta\tau)$  рассчитываются для всех каналов с заданной пропускной способностью, принадлежащих одному логическому каналу.

Для упрощения расчетов, предположим, что в одном физическом канале работает один логический. Выражение (4) учитывает требования к качеству обслуживания, которые можно оценить согласно:

$$Pl = \frac{1}{M} \sum_{l=1}^M P_l((n-l)\Delta\tau), \quad (7)$$

где  $M$  – количество уточняющих интервалов за время прогнозирования;

$P_l(\Delta\tau)$  – доля потерь за уточняющий интервал.

Точность прогнозирования основана на коэффициенте использования канала:

$$u = \frac{1}{M} \sum_{l=1}^M u_l((n-l)\Delta\tau), \quad (8)$$

где  $u_l(\Delta\tau)$  – коэффициент использования канала для уточняющего интервала.

Для принятия решения о том или ином значении пропускной способности сравниваются значения точности, а также выполнение требуемого параметра качества обслуживания (доли потерь). Для  $\lambda(\Delta\tau) > y(\Delta\tau)$ :

$$P(\Delta\tau) = 0, \quad ac(\Delta\tau) = \left[ \frac{\int_0^{\Delta\tau} \lambda(\Delta\tau) d\Delta\tau}{\int_0^{\Delta\tau} y(\Delta\tau) d\Delta\tau} \right],$$

для  $\lambda(\Delta\tau) < y(\Delta\tau)$ :

$$ac(\Delta\tau) = 1, \quad P(\Delta\tau) = \left[ \frac{\int_0^{\Delta\tau} \lambda(\Delta t) d\Delta t - \int_0^{\Delta\tau} y(\Delta t) d\Delta t}{\int_0^{\Delta\tau} \lambda(\Delta t) d\Delta t} \right].$$

Для прогнозирования трафика на основе предложенного подхода необходимо осуществлять тщательный выбор статистического интервала и интервала уточнения. Это происходит из-за достаточно большой изменчивости параметров трафика. Приемлемое значение величин статистического интервала и уточняющего интервала можно определить, исходя из условий обеспечения требуемых параметров качества обслуживания (7) и (8).

Ошибка прогнозирования, вносимая в величину пропускной способности, может быть уменьшена за счет использования более точных прогностических моделей. Для уменьшения погрешностей прогнозирования предложены следующие модификации:

– алгоритм с увеличением статистического интервала. Формирование статистических данных происходит в моменты времени, равные этим отсчетам:

$$c(i\Delta t) = \lambda(n \cdot \Delta t), \quad n = \Delta t, 2 \cdot \Delta t, \dots,$$

т.е. оценка значения в интервале статистики фиксируется каждые  $\Delta t$  отсчетов. Расчет значения пропускной способности в рамках уточняющего интервала производится согласно формуле (1);

– алгоритм с увеличением размера уточняющего интервала перераспределения. Значение пропускной способности определяется согласно следующему выражению:

$$b(m\Delta \tau) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k c((m(k-1) + i)\Delta t),$$

оценка значений трафика в рамках интервала статистики производится согласно (1);

– алгоритм максимальных значений осуществляет выбор максимальных значений из отсчетов в рамках статистического интервала и усреднение значений по уточняющему интервалу. Математическое выражение для оценки значений поступающего трафика в статистическом интервале:

$$c(i\Delta t) = \max_{l=1..n} (\lambda((i(n-1) + l)\Delta t)),$$

расчет значения пропускной способности, при этом будет соответствовать (2).

Для всех модифицированных алгоритмов условия выделения необходимой пропускной способности для дальнейшей передачи трафика соответствуют выражениям (3) – (6). Затем, согласно (7) – (8), произведен расчет оценок полученных значений пропускной способности по предложенным моделям (рисунок 1). На рисунке 1 приведены графические зависимости полученных оценок расчета: алгоритм 1 – алгоритм с увеличением статистического интервала; алгоритм 2 – алгоритм с увеличением уточняющего интервала; алгоритм 3 – алгоритм максимальных значений.



Рис. 1. Оценки модифицированных алгоритмов

Точность предложенных моделей оценивается на основе реальных наборов трафика. В качестве исследуемого трафика использовалась последовательность интенсивности http-запросов к серверу NASA [6] в течение месяца с периодичностью в 1 с. Для выбранной последовательности проведен анализ на самоподобность. Выявлено, что она обладает свойствами медленно убывающей зависимости с коэффициентом Херста равным 0,78. На основе анализа высказано предположение о том, что последовательность обладает краткосрочной «памятью». Это дает возможность для ее прогнозирования.

Небольшая точность представленных алгоритмов связана с «медленной» реакцией на резкие изменения параметров трафика. «Ускорение» возможно за счет применения подхода, учитывающего фрактальные свойства трафика, т.е. ARFIMA-модель.

В этом случае, соответствующая величина пропускной способности определяется исходя из:

$$y(m\Delta\tau) = \max_{i=1..k} (ARFIMA(c((m(k-1)+i)\Delta t))),$$

где  $ARFIMA(c((m(k-1)+i)\Delta t))$  – оценка отсчетов в рамках статистических интервалов, спрогнозированная с помощью ARFIMA-модели.

Условия окончательного расчета алгоритма соответствуют (3) – (6).

В представленных алгоритмах решение принимается на основе нахождения или максимального или среднего значения. Такое решения основано на возможностях мониторинга трафика: пиковые или усредненные значения трафика за интервал наблюдения. Алгоритмы, которые используют такие подходы обеспечивают заданные параметры, но отличаются малой точностью. Для повышения точности необходимо, чтобы расчетное значение величины пропускной способности было как можно ближе к значению интенсивности поступающего трафика.

$$b(m\Delta\tau) = \frac{\int_{(m-1)\Delta\tau}^{m\Delta\tau} c^*(m)\Delta\tau}{\Delta\tau},$$

где  $c_j^*(m\Delta\tau)$  – прогнозируемые значения интенсивности трафика для  $m$ -го интервала перераспределения, рассчитанного по следующему выражению:

$$c^*(m\Delta\tau) = ARFIMA(c(m(k-1)+i)\Delta\tau)). \quad (9)$$

Условия расчета оценок пропускной способности соответствуют (5) – (6).

Рассмотрим возможность комбинации двух алгоритмов, исходя из скорости изменения трафика. Для этого, нужно отслеживать начало и конец интервала, в котором трафик резко возрастает, что сводится к решению задачи о неравномерных уточняющих интервалах. Для этого реализации трафика прогнозируются, согласно выражению:

$$c^*((i+n)\Delta t) = ARFIMA(c((i(n-1)+l)\Delta t)), \quad n = 1, 2, \dots, t,$$

величина пропускной способности рассчитывается согласно (9). Начало и конец уточняющего интервала находится исходя из значения  $tr(n\Delta t)$  – функция приращения скорости изменения трафика, которая рассчитывается по реализации  $c^*((i+n)\Delta t)$ :

$$tr(n\Delta t) = \frac{c^*(i(n-1)+l)\Delta t - c^*(i(n-2)+l)\Delta t}{c^*(i(n-1)+l)\Delta t}, \quad n = 1, 2, \dots, t.$$

Если  $tr(n\Delta t) > 1$ , то фиксируется начало уточняющего интервала, если значение  $tr(n\Delta t)$  меняет знак с отрицательного на положительный, то фиксируется его конец. Аналогично происходит расчет при значениях  $tr(n\Delta t) < -1$  для начала уточняющего интервала регулирования и изменение знака с положительного на отрицательный соответственно. В том случае, если в течении времени прогнозирования трафик существенно не изменяется, то  $-1 < tr(n\Delta t) < 1$ . Итак, математическая модель определения начала и конца уточняющего интервала выглядит следующим образом:

$$m\Delta\tau = \begin{cases} n\Delta t, & tr(n\Delta t) > 1 \\ n\Delta t, & tr(n\Delta t) < -1, \\ n\Delta t_p, & \end{cases}$$

$$(m+1)\Delta\tau = \begin{cases} n\Delta t, & tr(n\Delta t) = 0 \\ n\Delta t, & tr(n\Delta t) = 0, \\ (n+1)\Delta t_p, & \end{cases}$$

где  $\Delta t_p$  – интервал прогноза.

Общим ограничением для математической модели остаются выражения (5).

Данный подход позволяет «реагировать» на трафик с высокой пачечностью, так как понятие «уточняющего интервала» появляется только в случае начала резкого изменения скорости поступающего трафика. Результаты моделирования согласно предложенному комбинированному алгоритму представлены на рисунке 2.



Рис. 2. Сравнение оценок ARFIMA-модели и комбинированной

Использование математической модели с адаптивным интервалом регулирования позволяет повысить коэффициент использования канальных ресурсов внутри ТЕ-туннеля на 25%, однако при этом параметр качества ухудшился на 10 %. Это указывает, что скорость адаптации представленных моделей также недостаточна для обеспечения заданных параметров качества обслуживания при расчете оценки пропускной способности ТЕ-туннеля.

**Выводы.** В статье, на основе имитационного моделирования, показано, что подход прогнозирования пропускной способности, учитывающем свойства трафика верен. Для обоснования этого использовались классический алгоритм и его модификации. Для них характерны обеспечение заданных параметров качества обслуживания (доли потерь) и низкая точность прогнозирования. Для повышения точности предложен алгоритм на основе ARFIMA-моделирования. Увеличение точности для этого алгоритма составляет не менее 30%. Однако, параметры обеспечения качества обслуживания остаются на низком уровне. Это объясняется тем, что трафик данных обладает высокой пачечностью. Для уменьшения влияния этой характеристики предложен комбинированный метод, позволяющий «отслеживать» начало и конец интервала в котором изменяется интенсивность трафика. Это дает возможность улучшить оценку эффективности прогнозирования до 40%.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Костромицкий, А. И. Подходы к моделированию самоподобного трафика / А. И. Костромицкий, В. С. Волотка // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – №46. – С. 46-49.
2. Rose, O. Estimation of the Hurst parameter of long-range dependent time series / O. Rose. – Report, 1996. – N. 137. – 14 p.
3. Zeigler, U. Mathematical modeling, simulation and optimization of dynamic transportation networks with applications in production and traffic: Dissertation, Dept. of Mathematics / Ute Cermakova Ziegler. – RWTH Aachen University, 2013.
4. Кричевский, А. М. Прогнозирование временных рядов с долговременной корреляционной зависимостью: дис. канд. техн. наук : 05.13.01 / Кричевский Андрей Михайлович. – СПб., 2008 – 179 с.
5. Ложковский, А. Г. Модель трафика в мультисервисных сетях с коммутацией пакетов / А. Г. Ложковский // Научные труды ОНАС им. А. С. Попова. – 2010. – № 1.
6. NASA-HTTP [Электронный ресурс] / The Internet Traffic Archive [Сайт]. – URL: <http://ita.ee.lbl.gov/html/contrib/NASA-HTTP.html> (дата обращения 10.06.2024).

*Поступила в редакцию 15.08.2024 г., рекомендована к печати 13.09.2024 г.*

#### COMMUNICATION CHANNEL'S BANDWIDTH PREDICTING APPROACH

*Sheptsov M.N., Klimov V.V.*

This work is aimed at analyzing existing and developing a new approach to predicting the communication channel's bandwidth based on the fractal properties of data traffic. Thus, the proposed approach uses the ARFIMA model, which allows increasing the accuracy of predicting the bandwidth taking into account the specified parameters of quality of service. The article also proposes a method for assessing the communication channel's bandwidth that takes into account the fractal properties of incoming traffic while ensuring the specified parameters of quality of service.

**Keywords:** predicting, bandwidth, communication channel, ARFIMA model, predicting accuracy, fractal properties, parameters of quality of service.

##### **Чепцов Михаил Николаевич**

доктор технических наук, профессор,  
ректор ФГБОУ ВО «Донецкий институт  
железнодорожного транспорта»,  
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк  
E-mail: [institut-transporta@mail.ru](mailto:institut-transporta@mail.ru)

##### **Sheptsov Mikhail Nikolaevich**

Doctor of Technical Science, Full Professor,  
Rector of Donetsk Institute of Railway Transport,  
Russian Federation, DPR, Donetsk.

##### **Климов Владимир Владимирович**

старший преподаватель кафедры автоматики и  
телекоммуникаций ФГБОУ ВО «Донецкий  
национальный технический университет»,  
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: [boban\\_cc@mail.ru](mailto:boban_cc@mail.ru)

##### **Klimov Vladimir Vladimirovich**

Senior Lecturer at Department of Automatics and  
Telecommunication of Donetsk National Technical  
University,  
Russian Federation, DPR, Donetsk.

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОБОЧНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ ПОСРЕДСТВОМ АЛГОРИТМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МАССИВА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СПЕКТРОГРАММ

© 2024 *Рушечников Я.И., Данилов В.В., Третьяков И.А., Зеленченко Д.Р.*

---

В данной работе представлены методы понижения размерности и нормирования, позволяющие более эффективно обрабатывать спектры радиосигналов, в том числе содержащих ПЭМИН.

**Ключевые слова:** ПЭМИН, спектральный анализ, программно-определяемая радиосистема, электромагнитное поле.

---

**Введение.** Побочные электромагнитные излучения и наводки (далее ПЭМИН) представляют собой совокупность спектральных составляющих, анализируя характеристики которых можно судить о опасности или о возможности перехвата информации с цифровых систем. Исследования данного явления в условиях сегодняшней постоянно растущей сложности электромагнитной обстановки носят востребованный характер [1-3]. Используя современный подход под названием «Результативная кибербезопасность» сигнал ПЭМИН можно отнести к критерию под названием «недопустимое событие» [4]. А степень недопустимости, или важности события напрямую определяется через совокупность маркеров (спектральных составляющих), по которым можно будет судить о возможности утечки информации по побочным каналам.

В данной статье рассматривается комбинация алгоритмов, позволяющая выделить из спектра экспериментальных данных составляющие, идентифицирующие и показывающие порядок размерности величин ПЭМИН во время проведения эксперимента. В качестве аппаратной системы используется программно-определяемое радио HackRF One.

**Общая методика проведения испытаний.** Методика и способы проведения эксперимента и оценки результатов напрямую зависят от среды, в рамках которой фиксируется ПЭМИН составляющие. Если в качестве такой среды выступает электрическая сеть, которую условно можно считать волноводом, контролируемая зона может простирается на многие десятки метров от источника утечки и по направлениям всех токоведущих линий, в том числе и заземления [5-8].

Оценивая же распространение ПЭМИН по средством электромагнитного поля стоит учитывать не только интерфейс, по средством которого передаётся сигнал (например HDMI) но и гармоники, а также то, что сигнал сложносоставной [9, 10]. Также учитывая сложность и многокомпонентность сигнала, приём его возможен лишь в ближней зоне электромагнитного поля, что требует специальных антенн для наведения в них ПЭМИН.

---

*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).*

---



Учитывая, что компоненты вычислительной техники, а также интерфейсы (в том числе и видеоинтерфейсы) по которым передаются конфиденциальные данные, на базе которых формируется ПЭМИН не являются изотропными источниками излучения можно выделить такие характеристики ближней зоны радиообнаружения, которые повлияют на методику оценки ПЭМИН:

1. В ближней зоне наблюдаются сильные колебания электромагнитного поля, и интенсивность может резко меняться с небольшими изменениями расстояния.
2. В ближней зоне электрическое и магнитное поле сильно взаимосвязаны и не формируют самостоятельных, устойчивых радиоволн, как это происходит в дальней зоне.
3. Ближняя зона обычно определяется расстоянием, меньше, чем  $\lambda/2\pi$ , где  $\lambda$  - длина волны. Для антенн высокой частоты это может составлять всего несколько метров, а для низкочастотных антенн - десятки метров.

Учитывая, что ПЭМИН видео интерфейсов встречается на частотах от 1 МГц, а его гармоники просачиваются и на 600 МГц, сложно применять стандартные методики как поиска так и оценки количественных характеристик сигнала, что в свою очередь требует разработки адаптивных методик и алгоритмов анализа экспериментальных данных.

**Алгоритм анализа количественных спектральных составляющих мощности сигнала, имеющего принадлежность к ПЭМИН.** Учитывая архитектуру, представленную на рис. 1 стоит заметить, что в силу сложности и многокомпонентности ПЭМИН сигнала чётко отчертить ближнюю и дальнюю зоны средствами доступных SDR систем не представляется возможным, но есть некоторые программные механизмы, позволяющие условно оформить эти границы.

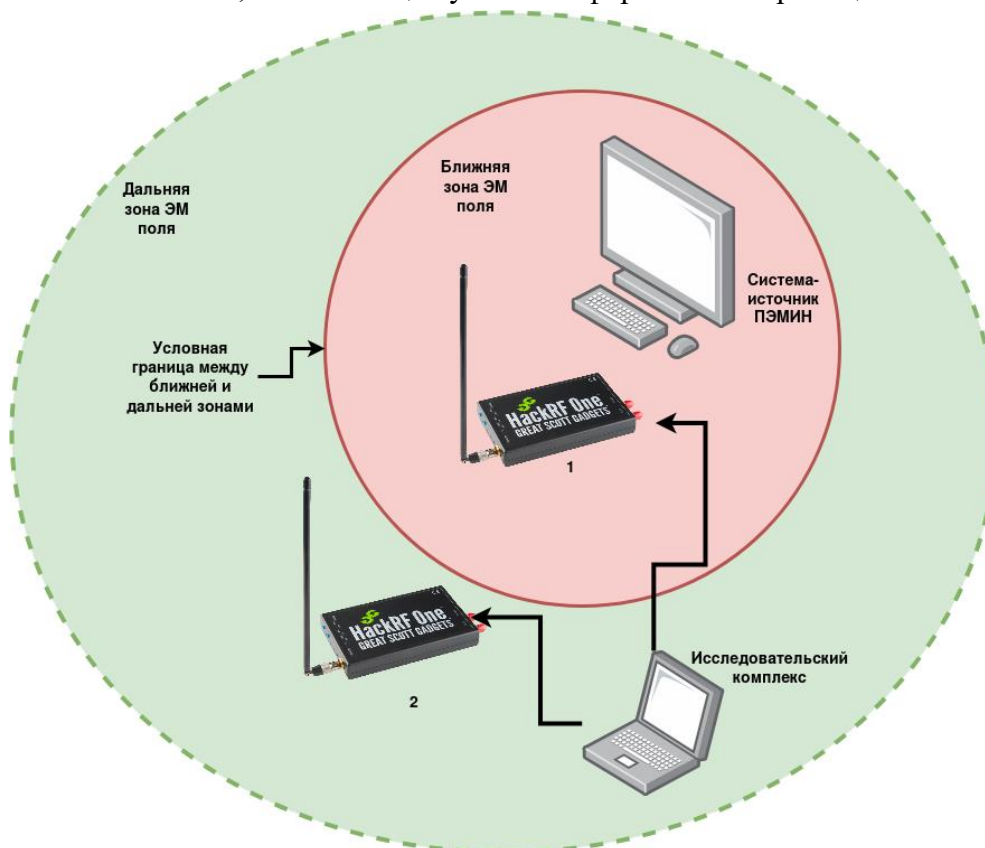


Рис. 1. Архитектура исследовательского комплекса по поиску и анализу сигналов ПЭМИН

В качестве дифференцирующего алгоритма данной задачи можно использовать корреляцию Пирсона, которая представляет собой линейную зависимость между двумя массивами экспериментальных спектров [11]. Формула для вычисления коэффициента корреляции Пирсона между массивами  $x$  и  $y$  выглядит так:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (1)$$

где  $x_i$  и  $y_i$  - значение элементов массивов экспериментальных данных из ближней и дальней зон соответственно;  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  - средние значения экспериментальных массивов;  $n$  - количество элементов в массиве.

Коэффициент корреляции Пирсона (1) может принимать значения от -1 до 1, где:

- +1 означает полную положительную линейную зависимость;
- -1 полную отрицательную линейную зависимость;
- 0 отсутствие линейной зависимости.

Несмотря на то, что корреляция Пирсона применима только к линейным зависимостям и имеет невысокую точность, но компактность её реализации и скорость работы позволяют качественно в виде коэффициента положительной или отрицательной корреляции оценить спектрограммы с двух разных источников, а это в свою очередь позволит в итерационном режиме найти участки частот с наибольшим присутствием ПЭМИН.

**Дихотомический итерационный способ поиска участка частот с явно выраженными ПЭМИН составляющими.** Первостепенной задачей по анализу количественных характеристик ПЭМИН является точная локализация участка с наиболее высокими уровнями мощности. Учитывая особенность современных SDR платформ, необходимо, чтобы данный участок с максимальными мощностными характеристиками целиком попадал в полосу одновременного приёма, следовательно в случае с SDR HackRF One такой шириной полосы будет 20 МГц, что эквивалентно ширине одновременного обзора приёмника.

Согласно алгоритму, представленному на рис. 2 в качестве начальных условий берётся полоса частот от 1 МГц до 1000 МГц и делится на две равные части, в каждой из которых вычисляется коэффициент Пирсона для спектрограммы в ближней и дальней зоне ЭМ поля. Та часть, в которой коэффициент выше поступает на следующую итерацию, в которой описанные действия повторяются. Алгоритм выполняется до тех пор, пока не будет определён участок шириной около 20 МГц, который и будет представлять участок спектра с максимальным ПЭМИН. В данном алгоритме для этого достаточно 6 итераций.

Несмотря на то, что у описанного выше алгоритма при сведении не всегда могут локализовываться участки с максимальным средним уровнем мощности, скорость его работы довольно высока, а в случае участков со схожими коэффициентами корреляции, на них можно дополнительно провести исследования.

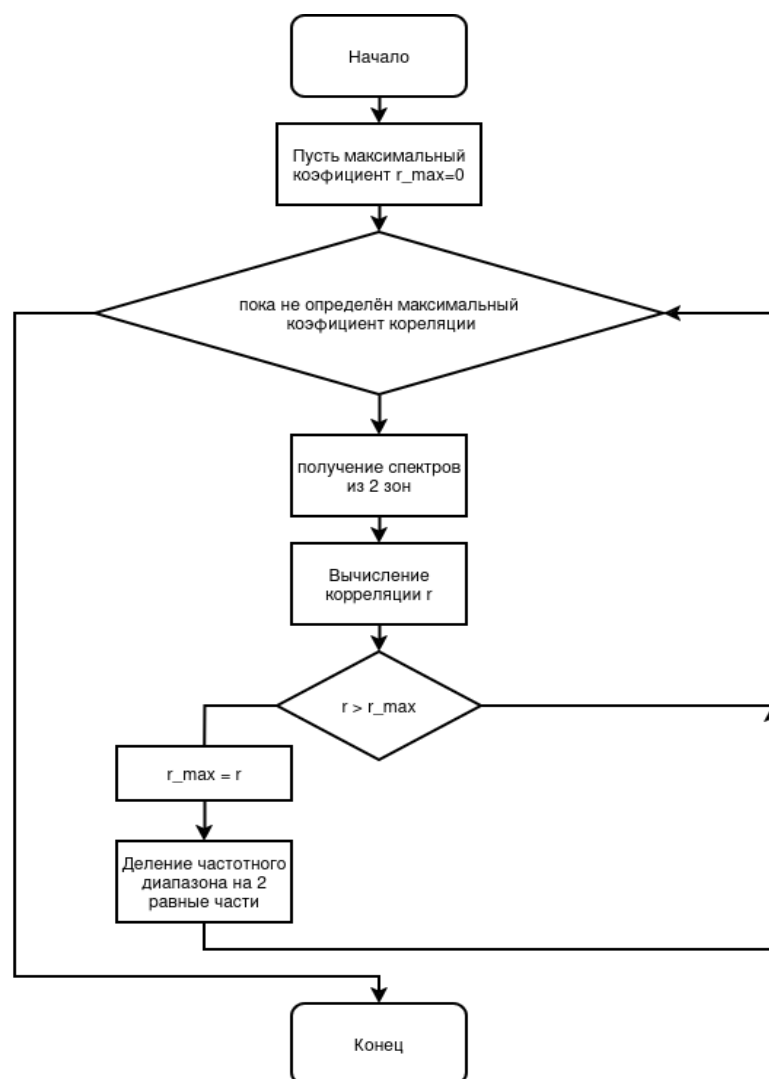


Рис. 2. Блок-схема алгоритма итерационного поиска участка с наибольшим ПЭМИН за счёт сравнения корреляции в ближней и дальней зоне ЭМ поля

**Алгоритм понижения размерности с целью ускорения обработки спектра.** Следующим этапом после сложения алгоритма, представленного на рис. 2 и получения спектров, содержащих ПЭМИН является алгоритм понижения размерности и вычисления суммарной групповой мощности участков, содержащих ПЭМИН. На рис. 3 эти этапы выделены заливкой.

Предложенный алгоритм условно формализован, и состоит из таких этапов:

1. Получение поэлементной разности между массивом спектра в ближней зоне и дальней зоне ЭМ поля.
2. Формирование порогового значения, ниже которого спектральные составляющие не будут учитываться. Спектральные составляющие размерностью менее пороговой функции обнуляются.
3. Определение границ возрастающих и убывающих последовательностей, имеющих большую спектральную ширину.
4. Уплотнение спектра за счёт сохранения наиболее содержательных в плане мощности последовательностей.
5. Расчёт результирующей мощности на уплотнённом спектре.



Рис. 3. Общий алгоритм поиска и оценки характеристик сигналов, содержащих ПЭМИН

В качестве исследуемого участка был выбран промежуток от 5 МГц до 25 МГц который содержит множественные составляющие ПЭМИН, источником которых является не только видеоинтерфейс HDMI, но и сам монитор. Анализируемый участок спектра представлен на рис. 4. Как видно, на разностной картине, содержащей два спектра, присутствует много участков, спектральные уровни на которых значительно отличаются. Выделение наиболее значащих участков из данной последовательности позволит оптимально подсчитать групповую мощность.

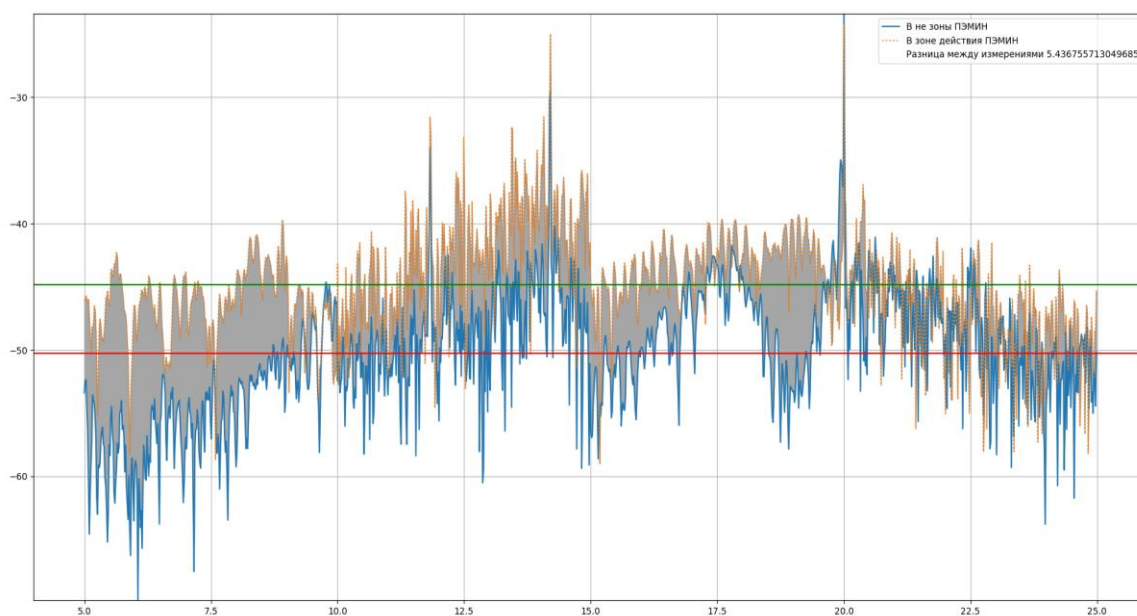


Рис. 4. Спектр сигнала, содержащего ПЭМИН

Вторым этапом формализованного алгоритма является определение порогового значения, ниже которого спектральные составляющие рассматриваться не будут. Это действие позволит более чётко очертить последовательности и несколько проредить спектральный шум между ними.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n},$$

где  $\bar{x}$  - среднее арифметическое,  $x_i$  - значения элементов в последовательности,  $n$  - количество элементов в последовательности.

Стоит также учитывать, что среднее арифметическое, особенно при анализе спектра не является робастным компонентом, так как условно подвержен изменениям при выбросах, но в условиях алгоритма оценки в ближней и дальней зоне обнаружения и при многократном усреднении влияние выбросов не оказывает существенного воздействия на пороговый коэффициент. Результаты применения порогового коэффициента показаны на рис. 5.

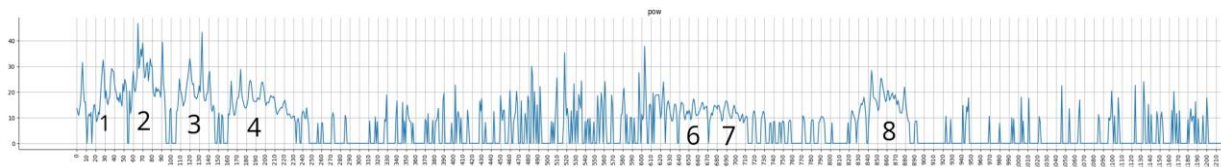


Рис. 5. Применение порогового коэффициента

Как видно из графика, представленного на рис. 5, выделяется несколько областей, содержащих немонотонные последовательности большой ширины. Именно эти последовательности можно подвергнуть подсчёту групповой мощности.

Следующей операцией после определения значащих частей спектра является уплотнение. Делается это за счёт отбрасывания компонент, которые являются немонотонными, но при этом узкими по частоте. Результирующий график представлен на рис. 6.

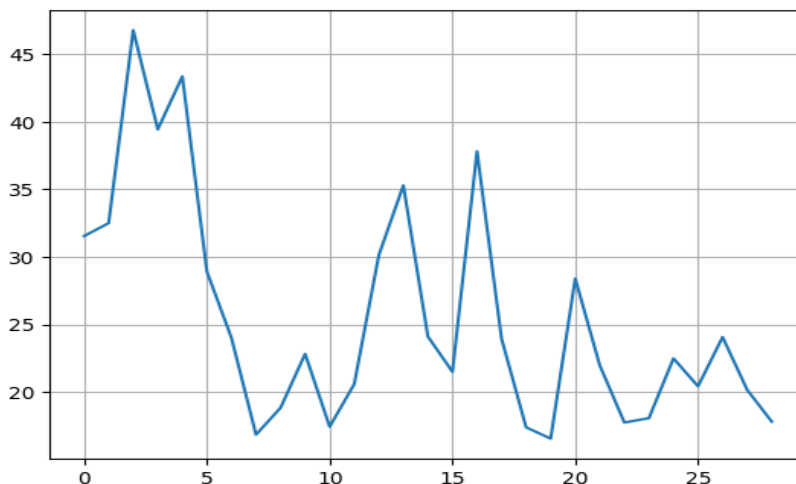


Рис. 6. Уплотнённый спектр сигнала ПЭМИН

Из полученной уплотнённой спектральной последовательности методом суммирования можно получить величину разностной мощности, которая описывает общие параметры ПЭМИН для заданного участка. Для описанного на рис. 6 уплотнённого спектра такая сумма составляет 740,94 условных единиц мощности, обнаруженных приёмником в частотном диапазоне от 5 МГц до 25 МГц в условиях разностной картины ближней и дальней зоны электромагнитного поля (ЭМП) сигнала ПЭМИН.

**Верификация метода оценки объёма ПЭМИН.** В качестве метода проверки оценки количественных характеристик сигнала, в том числе и содержащего ПЭМИН целесообразно провести исследование описанного выше алгоритма на частотном диапазоне УКВ вещательных станций от 88 МГц до 108 МГц. Для повышения контролируемости эксперимента был добавлен источник сигнала на частоте 100 МГц, который по своей сути является радиозакладным устройством, благодаря которому схема, представленная на рис. 1 и описанная методика оценки будут аналогичными, как и для ПЭМИН сигнала. В результате эксперимента были получены следующие формализованные результаты:

1. Поэлементная разность экспериментальных массивов в ближней и дальней зонах ЭМП с учётом многократного усреднения приводит лишь к незначительной селекции источника сигнала, функционирующего на частоте 100 МГц.
2. Нахождение порогового значения, ниже которого составляющие спектра не будут учитываться привели лишь к незначительному выделению пика немонотонной последовательности около частоты в 100 МГц.
3. Уплотнение спектра и расчёт результирующей суммарной мощности показывают, что общая размерность мощности невелика, и в несколько раз ниже аналогичной, реализуемой ПЭМИН.

**Выводы.** Описанная методика при помощи алгоритмической обработки спектров экспериментальных данных позволяет методом порогового выделения и уплотнения определить пространственные (на оси частот) характеристики мощности сигнала ПЭМИН в ближней и дальней зоне ЭМП. Полученный результат демонстрирует значительное падение мощностных характеристик ПЭМИН при проходе через условную ближнюю границу ЭМП, а размерность пространственной мощности позволяет условно судить о зоне, в рамках которой ПЭМИН будет представлять высоко вероятный технический канал утечки информации.

#### 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 ARQCJO.
2. Foziljonov, Kh. Active methods and means of information protection against leakage through channels of side electromagnetic radiation and interference / Kh. Foziljonov, I. Faziljanov // Science and innovation. – 2023. – V. 2(A4). – P. 46-52. – DOI 10.5281/zenodo.7818479.
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. Определение недопустимых событий [Электронный ресурс] / Открытая методология результативной кибербезопасности [Сайт]. – URL: <https://rezbez.ru/methodology/definition-non-tolerable-events/> (дата обращения 12.06.2024).
5. Третьяков, И. А. Структурно-лингвистический подход к описанию спектрограмм электромагнитных излучений, создаваемых вычислительной техникой / И. А. Третьяков // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: управление, вычислительная техника и информатика. – 2023. – № 1. – С. 64-70. – DOI 10.24143/2072-9502-2023-1-64-70. – EDN INRKY.
6. Рушечников, Я. И. Программно-аппаратное обеспечение исследования электромагнитных излучений, создаваемых вычислительной техникой, в бытовой электрической сети / Я. И. Рушечников, А. В. Яновский, И. А. Третьяков // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: управление, вычислительная техника и информатика. – 2023. – № 2. – С. 75-84. – DOI 10.24143/2072-9502-2023-2-75-84. – EDN LAFDGM.
7. Рушечников, Я. И. Локализация источника электромагнитного излучения посредством машинного обучения / Я. И. Рушечников, И. А. Третьяков // Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых: сборник научных трудов XXIII международной научно-технической конференции аспирантов и студентов (Донецк, 23-25 мая 2023 г.). – Донецк: ДОННТУ, 2023. – С. 145-147. – EDN IQZJGU.
8. Автоматизация процедуры обнаружения каналов ПЭМИН в бытовой электросети / И. А. Третьяков, Я. И. Рушечников, В. В. Данилов, В. А. Ступак // Инженерное образование в цифровом обществе: Материалы Международной научно-методической конференции в 2 ч. (Минск, 14 марта 2024 г.). – Ч. 1. – Минск: БГУИР, 2024. – С. 128-129. – EDN AJBRCV.
9. Хорев, А. А. Оценка возможности обнаружения побочных электромагнитных излучений видеосистемы компьютер / А. А. Хорев // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2014. – № 2(32). – С. 207-213. – EDN SEBGWX.
10. Шпилевой, А. А. О возможности аналитического обнаружения сигнала ПЭМИН в видеоинтерфейсах стандарта HDMI / А. А. Шпилевой, А. А. Персичкин // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Физ.-мат. и техн. науки. – 2022. – № 1. – С. 34-39. – EDN AWTJYC.
11. Методика автоматизированной оценки объёма побочных электромагнитных излучений / Я. И. Рушечников, В. В. Данилов, И. А. Третьяков, В. А. Ступак // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2024. – № 2. – С. 51-57. – DOI 10.5281/zenodo.12548548. – EDN UHOZKU.

*Поступила в редакцию 20.08.2024 г., рекомендована к печати 16.09.2024 г.*

METHOD FOR EVALUATING ELECTROMAGNETIC SIDE EFFECTS BY ALGORITHMIC PROCESSING OF AN ARRAY OF EXPERIMENTAL SPECTROGRAMS

*Rushechnikov I.A., Danilov V.V., Tretiakov I.A., Zelenchenko D.R.*

This paper presents methods of dimensionality reduction and normalization that allow for more efficient processing of radio signal spectra, including those containing TEMPEST.

**Keywords:** TEMPEST, spectral analysis, software-defined radio system, electromagnetic field.

**Рушечников Ярослав Иванович**

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

**Rushechnikov I Aroslav Ivanovich**

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

**Данилов Владимир Васильевич**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиофизики 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.

**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.

**Зеленченко Дмитрий Русланович**

аспирант, инженер кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет»,  
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: dima-pohta@mail.ru

**Zelenchenko Dmitrii Ruslanovich**

Postgraduate Student, Engineer at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk State University,  
Russian Federation, DPR, Donetsk.



**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ  
ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ РЕШЁТКИ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ  
ПЕРЕМЕЩАЮЩЕГОСЯ ПСЕВДООЖИЖЕННОГО СЛОЯ**

© 2024 *Надеев А.А., Кожухов Н.Н., Прутских Д.А., Дубанин В.Ю.*

В работе представлены результаты численного моделирования газораспределительного устройства технологического аппарата с перемещающимися по кольцевому каналу псевдоожигенным слоем. Рассмотрен один вариант конструкции аппарата и газораспределительного устройства. Составлена и проверена на адекватность математическая модель работы аппарата. В результате вычислительного эксперимента получено распределение давления в сечениях аппарата, его гидравлическое сопротивление, распределение скоростей вдоль лопатки, а также зависимости гидравлического сопротивления газораспределительного устройства и зависимость скорости воздуха на выходе из решётки от скорости потока воздуха на входе в аппарат. Результаты численного и аналитического решения имеют удовлетворительное совпадение.

**Ключевые слова:** псевдоожигение, газораспределительное устройство, численный метод, гидравлическое сопротивление, скорость воздуха.

**Введение.** Технология псевдоожигения широко применяется в химической, пищевой, фармацевтической промышленности, а также в агропромышленном комплексе [1, 2]. Использование данной технологии обеспечивает активное взаимодействие газовой фазы и дисперсного материала (твёрдой фазы), что приводит к повышению интенсивности процессов тепло- и массообмена и выравниванию полей температур. Кроме того, псевдоожигенный слой имеет небольшое гидравлическое сопротивление и обладает свойством текучести. Последнее свойство позволяет применять данную технологию в непрерывных процессах, что особенно актуально для промышленности [3]. Для перемещения псевдоожигенного слоя дисперсного материала может применяться два способа:

- 1) механические транспортёры различных конструкций;
- 2) динамическое воздействие направленных потоков газовой фазы.

Первый способ усложняет контракцию аппарата, второй не имеет данного недостатка и позволяет совместить процессы тепломассообмена и транспорта дисперсного материала.

Применение второго способа привело к возникновению двух видов аппаратов различного сечения – прямоугольного и круглого. Традиционной конструкцией аппаратов с прямоугольной рабочей камерой является сушилка ДПИ [4]. Аппараты с цилиндрической рабочей камерой представлены, например, сушильной установкой кипящего слоя для термолабильных материалов [5]. Обе конструкции достаточно просты позволяют организовать перемещение материала и осциллирующий режим.

**Описание конструкции и принципа работы аппарата и постановка задачи.** В данной работе рассматривается аппарат с цилиндрической рабочей камерой, в котором организован центробежный псевдоожигенный слой (рис. 1), который потенциально позволяет повысить интенсивность тепло- и массообмена [6, 7]. Он состоит из рабочей камеры 1, где реализуется теплотехнологический процесс и двух газовых камер 2, предназначенных для подачи и отвода ожигающего агента.

Для целенаправленного формирования перемещающегося и центробежного слоя в рассматриваемом аппарате применяются различные по конструкции газораспределительные устройства. Наиболее актуальными являются устройства жалюзийного типа [8] Их характерной особенностью является наличие лопаток, расположенных под заданным углом к горизонтальной плоскости. Угол наклона лопаток, их количество и форма (как и вид самого газораспределителя) оказывают непосредственное влияние на характеристики псевдооживленного слоя – высоту, скорость движения, скорость начала псевдооживления, а также стабильность. На данные параметры влияет и вид дисперсного материала. Поэтому выбор характеристик газораспределительного устройства для конкретного материала и заданных геометрических размеров рабочей камеры является сложной задачей, требующей изготовления большого количества экспериментальных образцов. Однако, в настоящее время в связи с активным развитием численного моделирования физических процессов предварительное решение данной задачи можно получить без проведения натурального дорогостоящего эксперимента. В связи с этим, целью работы является создание численной модели для инженерных расчётов газораспределительных решёток для формирования центробежного псевдооживленного слоя.

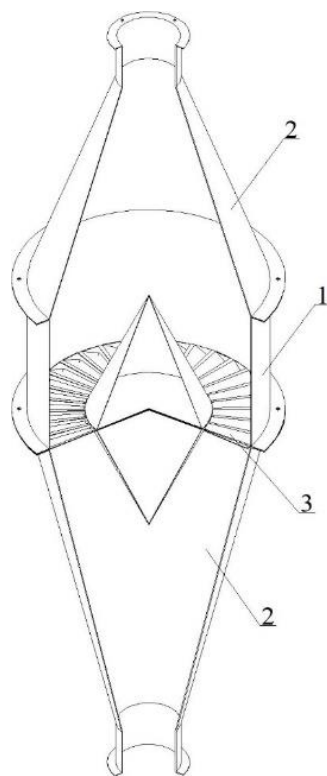


Рис. 1. Схема аппарата с цилиндрической рабочей камерой:

1 – рабочая камера; 2 – газовые камеры; 3 – газораспределительное устройство

При работе аппарата формируется псевдооживленный слой, циркулирующий в цилиндрической рабочей камере 1, т.е. слой в данном случае является направленно перемещающимся. При значительных скоростях оживающего агента и изменении конструктивных параметров газораспределительного устройства организуется центробежный псевдооживленный слой в котором интенсивность тепло- и массообмена дополнительно увеличивается за счёт воздействия на частицы слоя центробежных сил [6, 7].

Исследуемая газораспределительная решётка относится к газораспределительным устройствам жалюзийного типа и изготавливается из листового металла толщиной 0,7 мм методом штамповки. Общий вид её конструкции в составе аппарата представлен на рис. 1. Данная решётка имеет диаметр 430 мм. 32 лопатки расположены под углом  $17^\circ$  к горизонтальной плоскости и имеют длину 89 мм в плоскости решётки и 83 мм в нижней части. Углы лопаток имеют радиус изгиба 2 мм. Внутреннее кольцо решётки диаметром 200 мм служит для крепления двух элементов – снизу газораспределительного конуса, сверху – конуса (или цилиндра), предназначенных для формирования кольцевого канала, по которому циркулирует псевдооживленный слой.

В работе для проведения вычислительного эксперимента рассмотрены следующие геометрические характеристики аппарата: внутренний диаметр рабочей камеры аппарата 380 мм, её высота 250 мм; высота нижней газовой камеры 1030 мм; высота верхней газовой камеры 390 мм; внутренний диаметр цилиндрической части газовых камер 100 мм, высота 80 мм; диаметр основания газораспределительных конусов 200 мм, их высота 220 мм.

Подаваемым в аппарат газом является атмосферный воздух, выполняющий при псевдооживлении роль оживающего агента. Он входит в нижнюю газовую камеру, проходит через газораспределительное устройство, создаёт псевдооживленный слой и выходит из верхней газовой камеры.

**Численное моделирование гидродинамики аппарата.** Для моделирования рассматриваемого процесса в аппарате использовался один из пакетов численного моделирования, распространенный как за рубежом, так и в нашей стране [9]. Для описания гидродинамики использовалась система уравнений (1) - (5):

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-\rho \mathbf{I} + \mathbf{K}] + \mathbf{F}; \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0; \quad (2)$$

$$\mathbf{K} = (\mu + \mu_T) (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T); \quad (3)$$

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) k = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon; \quad (4)$$

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \varepsilon = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon = \varepsilon_p$ ;  $\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ ;  $P_k = \mu_T \left[ \nabla \bar{\mathbf{u}} : (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \right]$ ;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости;  $\mu_T$  – вихревая (турбулентная) вязкость;  $\rho$  – плотность;  $\mathbf{u}$  – вектор скорости;  $k$  – турбулентная кинетическая энергия;  $\varepsilon$  – скорость турбулентной диссипации;  $U$  и  $L$  – масштабы скорости и длины соответственно;  $C_\mu$ ,  $C_{\varepsilon 1}$ ,  $C_{\varepsilon 2}$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$  – эмпирические коэффициенты;  $\mathbf{K}$  – тензор вязких напряжений;  $P_k$  – генерация турбулентной кинетической энергии.

При решении задачи приведенная система решалась при следующих условиях:

- на входе скорость составляет  $u_0$ , вектор которой направлен по нормали к соответствующей границе;
- на выходе задавалась величина избыточного давления, составляющая 0 Па;
- на стенках – условия прилипания;
- турбулентная интенсивность при этом составляла  $I_T = 0,05$ , а масштаб турбулентности определялся геометрией модели.

Ниже приведены уравнения, соответствующие принятым условиям:

- на входе

$$\mathbf{u} = -U_0 \mathbf{n}; U_{ref} = U_0; k = \frac{3}{2} (U_{ref} I_T)^2; \varepsilon = C_{\mu}^{3/4} \frac{k^{3/2}}{L_T};$$

- на выходе

$$[-p\mathbf{I} + \mathbf{K}]\mathbf{n} = -\hat{p}_0 \mathbf{n}.$$

При этом

$$\hat{p}_0 \leq p_0, \nabla \mathbf{k} \cdot \mathbf{n} = 0, \nabla \varepsilon \cdot \mathbf{n} = 0.$$

Основной характеристикой любого газораспределительного устройства является его гидравлическое сопротивление, определяемое потерями давления. Для дополнительной оценки эффективности газораспределительной решётки необходимо определить скорость воздуха на выходе из решётки и угол выхода потоков воздуха.

Определение потерь давления основано на использовании результатов вычисления давления в трёх горизонтальных сечениях:

- сечение 1 расположенное на расстоянии 15 мм ниже плоскости решётки. Данное расстояние было выбрано таким образом, чтобы сечение не пересекало лопатки;
- сечение 2 расположенное на расстоянии 10 мм выше плоскости решётки;
- сечение 3 расположенное на расстоянии 120 мм выше плоскости решётки. Выбор именно этого сечения обоснован условиями эксплуатации аппарата, при которых высота направленно перемещающегося (центробежного) псевдооживленного слоя не должна превышать 100 мм [10].

На рис. 2, а-в приведено распределение давлений в рассматриваемых сечениях при скорости воздуха на входе в аппарат 10 м/с.

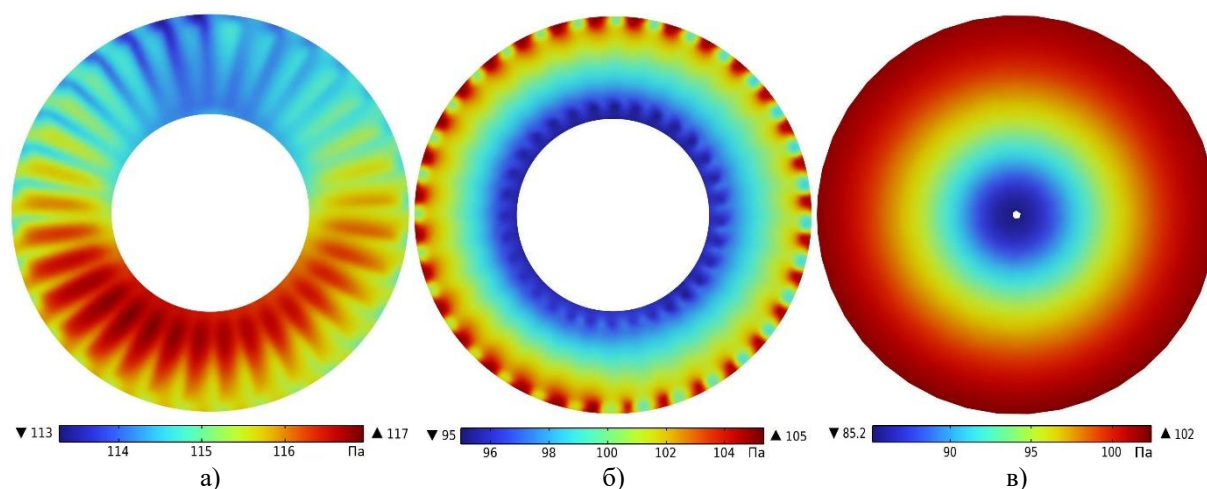


Рис. 2. Распределение давления в сечении 1 при скорости 10 м/с:  
а) сечение 1; б) сечение 2; в) сечение 3

Как видно из рис. 2а в конце диффузора перед газораспределительной решёткой распределение давлений несимметрично – в нижней части давление выше. Это соответствует характеру течения потока в диффузорах, описанному в работе [11]. Однако величина несимметричности незначительна и составляет не более 4 Па, что может быть связано с наличием газораспределительного конуса под решёткой. Кроме того, из приведенных данных видно, что на структуру потока в данном сечении оказывает влияние сама решетка, формируя области пониженного и повышенного давления. Отметим, что при других скоростях распределение давлений имеет аналогичный характер.

С увеличением расстояния над решеткой распределение давления приобретает более симметричный характер. Следует отметить, что в центре сечений 2 и 3 давление меньше, чем на периферии (рис. 2 б-в). Это связано с равномерным распределением полей давления и скорости при прохождении воздуха через решётку. Дальнейшее распределение давления в рабочей камере аппарата имеет вид и значения, аналогичные распределению в сечении 3, что может быть связано с влиянием на характер потока как верхнего конуса, так и циркуляцией потока по окружности.

На рис. 3 представлены зависимости потерь давления на газораспределительной решётке от скорости движения воздуха на входе в нижнюю газовую камеру. Величина потерь давления определялась разницей между давлением до решётки и после неё.

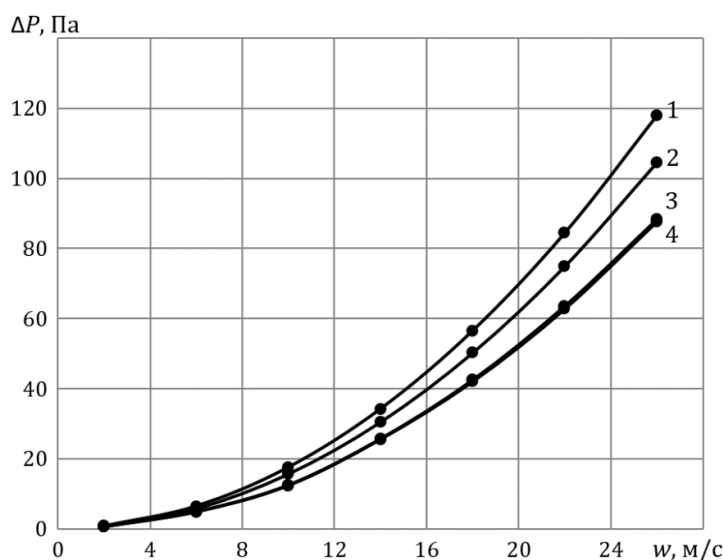


Рис. 3. Потери давления в газораспределительной решётке от скорости воздуха:

1 –  $\Delta P_{Cp1}$ ; 2 –  $\Delta P_{Cp2}$ ; 3 –  $\Delta P_{II1}$ ; 4 –  $\Delta P_{II2}$

Значения потерь давлений  $\Delta P$ , Па на рис. 3 вычислены по формулам:

$$\Delta P_{Cp1} = P_{Cp}^1 - P_{Cp}^2;$$

$$\Delta P_{Cp2} = P_{Cp}^1 - P_{Cp}^3;$$

$$\Delta P_{II1} = P_{II}^1 - P_{II}^2;$$

$$\Delta P_{II2} = P_{II}^1 - P_{II}^3,$$

где  $P_{Cp}^1, P_{Cp}^2, P_{Cp}^3$  – средние значения давлений в соответствующих сечениях, Па;  $P_{II}^1, P_{II}^2, P_{II}^3$  – средние значения давлений по линии внешней окружности (периферии), откуда в реальных условиях эксперимента должен производиться отбор давления через штуцеры, Па.

На рис. 3 видно полное совпадение потерь давления, полученных по значениям на периферии сечений  $\Delta P_{II}$ , т.е. внешней части корпуса аппарата (кривые 3, 4). Потери давления, полученные по средним значениям давлений  $\Delta P_{Cp}$ , уменьшаются с высотой рабочей камеры и находятся между кривыми 1 и 2. При этом выше 120 мм над решёткой изменения оказались незначительны.

При прохождении воздуха через газораспределительную решётку изменяется не только направление потока, но и величина его скорости. При этом вертикальная составляющая данной скорости потока отвечает за переход слоя дисперсного материала в псевдооживенное состояние, горизонтальная – за перемещение слоя по кольцевому каналу вдоль решётки. Если известен угол наклона лопаток  $\alpha$ , то результирующая скорость  $w_0$ , м/с будет определяться по формуле

$$w_0 = w_1 / \sin \alpha.$$

где  $w_1$  – вертикальная составляющая результирующей скорости, м/с. Её значение можно принять равной скорости воздуха перед решёткой [8].

На рис. 4 приведена зависимость скорости движения потока воздуха на выходе из решётки от скорости движения воздуха на входе в аппарат.

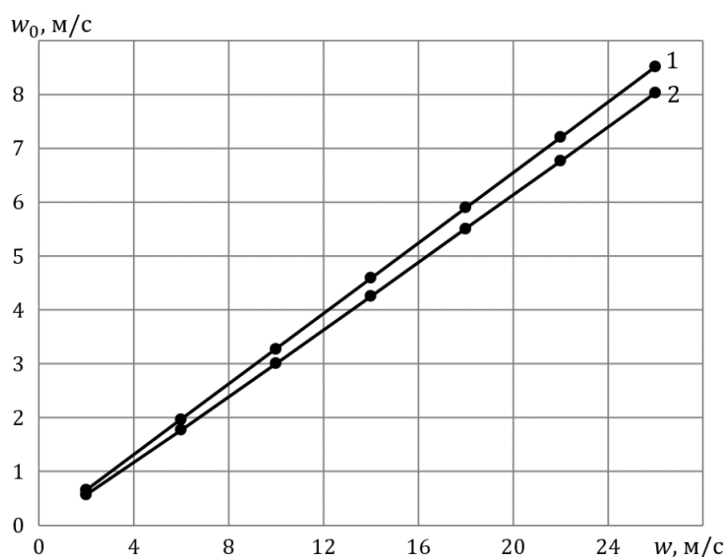


Рис. 4. Зависимость скорости на выходе из решетки от начальной скорости потока:  
1 – расчет по формуле (6); 2 – результат численного моделирования

Кривая 1 получена в результате расчёта по формуле (6), кривая 2 представляет среднюю скорость воздуха по сечению, расположенному на 0,5 мм выше плоскости решётки. Как видно из данного рисунка относительное отклонение скорости воздуха на выходе из решетки  $w_0$  составляет не более 14 %. При этом с увеличением скорости воздуха на входе в аппарат  $w$  величина абсолютного отклонения возрастает, а относительного – уменьшается до 6 %.

На стабильность псевдооживленного слоя влияет распределение скоростей по всей плоскости газораспределительной решётки. На рис. 5 приведено распределение скорости воздуха на выходе из решётки при  $w = 10$  м/с для сечения, расположенного на 0,5 м выше неё. При других скоростях это распределение имеет аналогичный характер. Из рисунка видно, что в местах крепления лопаток скорость воздуха практически равна нулю. На основной части лопаток скорость имеет более равномерный характер. Это показано на графике распределения скорости  $w_0$  вдоль ребра изгиба лопатки решётки (рис. 6).

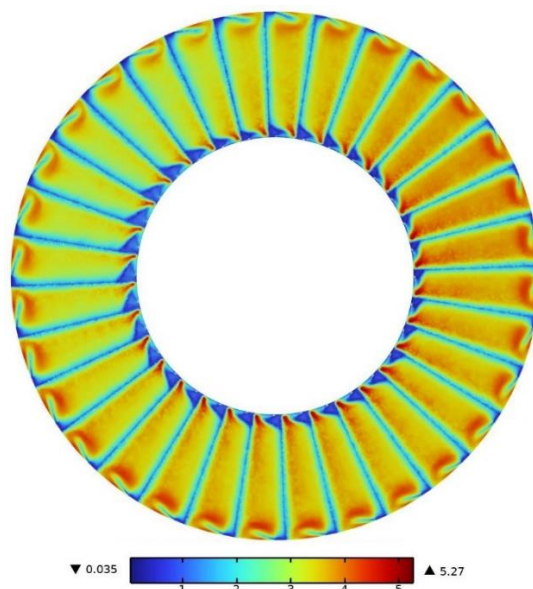


Рис. 5. Распределение скорости воздуха на выходе из решетки  $w_0$  при начальной скорости 10 м/с

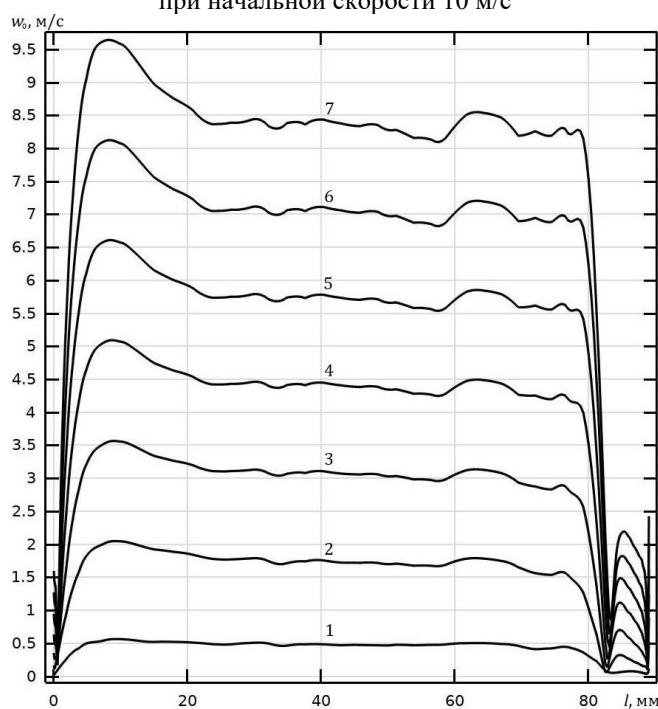


Рис. 6. Распределение скорости  $w_0$  вдоль ребра изгиба лопатки:  
 1 –  $w = 2$  м/с; 2 –  $w = 6$  м/с; 3 –  $w = 10$  м/с; 4 –  $w = 14$  м/с; 5 –  $w = 18$  м/с ;  
 6 –  $w = 22$  м/с; 7 –  $w = 26$  м/с

Отметим, что на внешней части решётки ( $l = 0$  мм) скорость воздуха имеет максимальные значения. При  $l \approx 83$  мм происходит падение скорости до 0 м/с и затем некоторый рост, что связано с особенностями конструкции лопатки, имеющей в месте изгиба длину 89 мм и 83 мм в конечной ее части.

**Выводы.** Результаты исследования показывают, что рассматриваемый вариант конструкции газораспределительного устройства имеет относительно небольшой перепад давления. К тому же, после прохождения через него формируются такие поля скоростей и давлений, которые будут способствовать не только образованию стабильного и равномерного псевдооживленного слоя, но и потенциально позволят увеличить интенсивность теплообмена.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Handbook of Industrial Drying / A. S. Mujumdar, J. Adamiec, J. Y. Hung et al.; Edited by A. S. Mujumdar. – 4-rd edition. – CRC Press, 2014. – 1348 p.
2. Smith, P. Applications of Fluidization to Food Processing / P. Smith. – Blackwell Science, 2007. – 264 p.
3. Gibilaro, L. G. Fluidization Dynamics / L. G. Gibilaro. – Butterworth-Heinemann, 2001. – 256 p.
4. Романков, П. Г. Сушка во взвешенном состоянии / П. Г. Романков, Н. Б. Рашковская. – М.: Химия, 1979. – 272 с.
5. Лукьяненко, В. И. Сушильная установка кипящего слоя для термолабильных материалов / В. И. Лукьяненко, Ю. Н. Агапов, В. Г. Стогней // Изобретатели – машиностроению. – 2005. – № 4 (35). – С. 2-3.
6. Фалеев, В. В. Исследование межфазного теплообмена в регенеративном теплообменнике с дисперсной насадкой / В. В. Фалеев, А. В. Бараков // Промышленная энергетика. – 2003. – № 6. – С. 35–37.
7. Агапов, Ю. Н. Экспериментальное исследование теплообмена в центробежном псевдооживленном слое / Ю. Н. Агапов, Д. И. Медведев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2003. – № 7.3. – С. 153–158.
8. Экспериментальное сравнение газораспределительных устройств для формирования центробежного слоя / Д. Ю. Агапов, А. А. Надеев, К. Н. Родионов [и др.] // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8. – № 7-1. – С. 118-121.
9. Шустрова, М. Л. Средства численного моделирования гидродинамических параметров процессов / М. Л. Шустрова, И. М. Аминев, А. Д. Байтимиров // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – № 14. – С. 221-224.
10. Влияние высоты псевдооживленного слоя на параметры газораспределительной решётки / В. И. Лукьяненко, Ю. Н. Агапов, А. П. Бырдин [и др.] // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2006. – Т. 2. – №6. – С. 139-143.
11. Идельчик, И. Е. Аэрогидродинамика технологических аппаратов. (Подвод, отвод и распределение потока по сечению аппаратов) / И. Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1983. – 351 с.

*Поступила в редакцию 15.05.2024 г., рекомендована к печати 03.06.2024 г.*



NUMERICAL STUDY OF HYDRODYNAMICS OF GAS DISTRIBUTION GRID FOR FORMING  
A MOVING FLUIDIZED BED

*Nadeev A.A., Kozhukhov N.N., Prutskikh D.A., Dubanin V.IU.*

The paper presents the results of numerical modeling of the gas distribution device of a technological apparatus with a fluidized bed moving along an annular channel. One design option for the apparatus and gas distribution device is considered. A mathematical model of the apparatus operation was compiled and tested for adequacy. As a result of the computational experiment, the distribution of pressure in the sections of the apparatus, its hydraulic resistance, the distribution of velocities along the blade, as well as the dependence of the hydraulic resistance of the gas distribution device and the dependence of the air speed at the outlet of the grill on the speed of the air flow at the entrance to the apparatus were obtained. The results of the numerical and analytical solution are in satisfactory agreement.

**Keywords:** fluidization, gas distribution device, numerical method, hydraulic resistance, air speed.

**Надеев Александр Александрович**

кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и промышленной теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»,  
Российская Федерация, г. Воронеж.  
E-mail: anadeev@cchgeu.ru

**Nadeev Aleksandr Aleksandrovich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Theoretical and Industrial Thermal Power Engineering of Voronezh State Technical University,  
Russian Federation, Voronezh.

**Кожухов Николай Николаевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и промышленной теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»,  
Российская Федерация, г. Воронеж.  
E-mail: nnkozhukhov@cchgeu.ru

**Kozhukhov Nikolai Nikolaevich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Theoretical and Industrial Thermal Power Engineering of Voronezh State Technical University,  
Russian Federation, Voronezh.

**Прутских Дмитрий Александрович**

кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и промышленной теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»,  
Российская Федерация, г. Воронеж.  
E-mail: dprutskikh@cchgeu.ru

**Prutskikh Dmitrii Aleksandrovich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Theoretical and Industrial Thermal Power Engineering of Voronezh State Technical University,  
Russian Federation, Voronezh.

**Дубанин Владимир Юрьевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и промышленной теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»,  
Российская Федерация, г. Воронеж.  
E-mail: vdubanin@cchgeu.ru

**Dubanin Vladimir IUrevich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Theoretical and Industrial Thermal Power Engineering of Voronezh State Technical University,  
Russian Federation, Voronezh.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ТЕРМОСТАТИРОВАНИИ ПОВЕРХНОСТИ КАНАЛОВ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

© 2024 *Базыкин Д.А., Орехов Е.А., Дахин С.В.*

---

В статье рассмотрена проблема снижения эффективности выработки электроэнергии термоэлектрической генераторной установкой за счет изменения температуры холодного и горячего потоков воздуха в процессе их движения внутри плоских каналов, решение которой заключается в обеспечении равномерности температурного поля или термостатировании поверхности стенок каналов, которое можно осуществить путем установки в полости каналов продольного оребрения с переменной высотой. Показана принципиальная схема разработанной экспериментальной установки, описан принцип ее действия, представлены результаты численного моделирования теплообмена в каналах при их базовой конструкции, при установке в них ребер с фиксированной высотой и ребер с переменной высотой, выполнено их сравнение, приведены расчетные значения полезной тепловой мощности для каждого из вариантов.

**Ключевые слова:** термоэлектрические генераторные модули, эффект Зеебека, эффект Ранка-Хилша, экспериментальная установка, оребрение переменной высоты, численное моделирование, теплообмен, плоские каналы.

---

**Введение.** Одним из безусловно важных направлений нефтегазовой промышленности является создание и совершенствование устройств, необходимых для автономного энергоснабжения оборудования различного типа, применяющегося на объектах, находящихся в труднодоступных, децентрализованных районах нашей страны. К настоящему времени разработано достаточно большое количество разнообразных по принципу действия и характеристикам установок автономной генерации электроэнергии. Подобным примером является термоэлектрическая генераторная установка, принцип действия которой основан на термоэлектрическом эффекте Зеебека совместно с вихревым эффектом Ранка-Хилша, благодаря чему выработка электрической энергии осуществляется за счет преобразования внутренней энергии газообразной рабочей среды, причем какие-либо процессы горения в технологическом цикле отсутствуют, что, в свою очередь, способствует минимизации вреда экологии окружающей местности, а также снижению пожаро- и взрывоопасности промышленных объектов [1, 2]. Указанная установка способна генерировать электроэнергию для снабжения маломощного оборудования, например, аппаратуры и средств для обустройства «цифровых месторождений», систем автоматического управления и контроля и др. и имеет ряд преимуществ, заключающихся в отсутствии необходимости периодического технического обслуживания, длительной автономной работоспособности, в том числе в условиях сурового климата [3, 4].

В статье [5] были представлены результаты выполненного численного моделирования процессов теплообмена и вариантов его интенсификации в каналах термоэлектрической генераторной установки. Интенсификация теплообмена в плоских каналах заключалась в снижении значения площади проходного сечения с одновременной установкой в их полости поперечных сплошных перегородок, способствующих попеременному изменению направления движения холодного и горячего потоков воздуха.

Указанные перегородки в отдельных вариантах имели различные геометрические размеры и шаг их установки. В результате проведенных исследований был сделан вывод о том, что выбранный метод интенсификации теплообмена способствует увеличению значения теплового потока, переданного термоэлектрическим генераторным модулям (ТГМ), а, соответственно, и приросту мощности генерируемого ими электрического тока, за счет чего снижается количество ТГМ, необходимых для получения требуемых характеристик электроснабжения, что приводит к снижению капиталовложений.

В описываемой установке генерация электрической энергии выполняется за счет ТГМ, принцип действия которых основан на эффекте Зеебека, заключающемся в возникновении термо-ЭДС в местах контакта разнородных материалов при их нагревании с одной и охлаждения с противоположной сторон. ТГМ представляют собой совокупность термопар, в основном, последовательно соединенных между собой в единую цепь, при этом общее их количество может варьироваться от десятков до сотен [6]. В том случае, когда на одной из сторон модуля температура будет отличаться от температуры противоположной стороны, то на выходных контактах возникнет термо-ЭДС, причем ее значение прямо пропорционально разности температур между указанными сторонами [7, 8].

**Постановка задачи.** При проведении дальнейших исследований было выявлено снижение эффективности выработки электроэнергии как каждым отдельным модулем, так и группой модулей за счет изменения температуры холодного и горячего потоков воздуха в процессе их движения внутри плоских каналов, а также изменения температуры стенки указанных каналов по длине. При этом общее значение мощности электрического тока в цепи будет значительно зависеть от модулей, генерирующих ток с наименьшим значением электрической мощности, что подтверждается в [9].

Так как термоэлементы, из которых состоят модули, отделены друг от друга и соединены между собой последовательно, важно, чтобы разность температур между сторонами ТГМ поддерживалась на одном уровне для каждого из указанных термоэлементов, для получения максимального КПД модуля. Причем ТГМ зачастую объединяют в группу и соединяют их последовательно, либо параллельно, либо комбинацией указанных способов, в зависимости от условий конкретной задачи и предусмотренного конечного значения мощности генерируемого тока, причем эффективность выработки электроэнергии указанной группой также зависит от изменения температурного поля поверхности каждого из модулей. Авторами [9, 10] экспериментально подтверждено увеличение эффективности генерации группой ТГМ при выравнивании температурного поля поверхности. В связи с вышеизложенным, задача обеспечения равномерного распределения температуры стенки каналов для прохода холодного и горячего теплоносителей в местах установки ТГМ является важной, а ее решение способствует увеличению численного значения мощности генерируемого ими электрического тока.

**Решение поставленной задачи.** В ходе дальнейших работ было предложено решение указанной задачи, заключающееся в термостатировании поверхности термоэлектрических генераторных модулей, а, соответственно, и выравнивании температурного поля стенок плоских каналов, контактирующих с ТГМ, которое можно осуществить применив метод продольного оребрения указанной поверхности ребрами с переменной высотой [11, 12]. Изменение высоты и количества ребер позволяет регулировать значение площади поверхности теплообмена, за счет чего выполняется равномерное распределение температуры стенок плоских каналов и, следовательно, теплового потока по поверхности термоэлектрических генераторных модулей, что подтверждается в исследованиях [13-15].

**Описание и принцип действия установки.** Для проведения исследований метода повышения эффективности термоэлектрической генераторной установки, заключающегося в термостатировании поверхностей каналов, непосредственно контактирующих с ТГМ, была разработана принципиальная схема ее экспериментального образца, которая представлена на рис. 1.

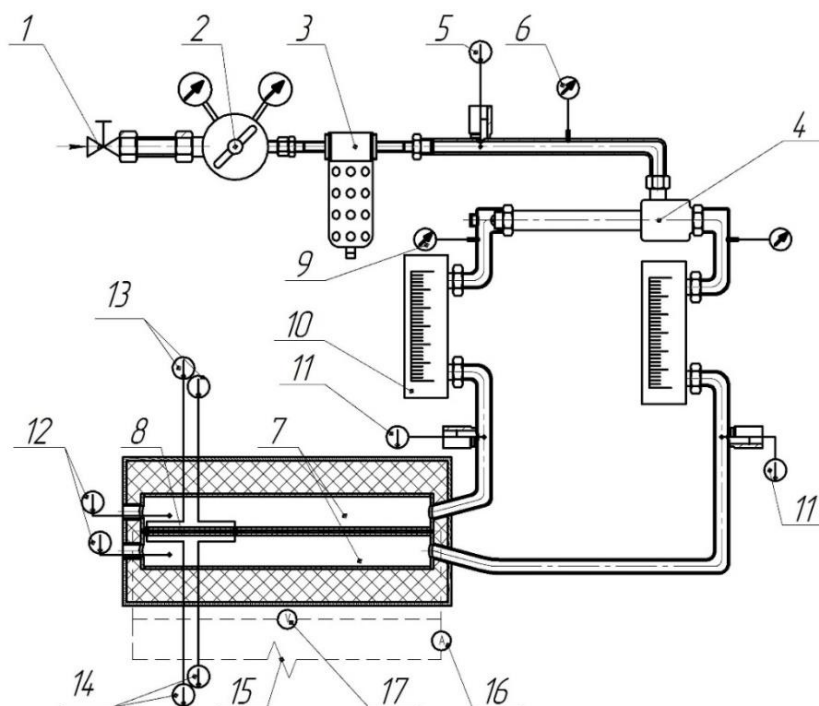


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального образца термоэлектрической генераторной установки

При открытии запорно-регулирующей арматуры 1 рабочее тело от компрессора, а именно – поток сжатого воздуха, имеющий высокое давление, подается к регулятору давления 2, с помощью которого осуществляется снижение давления до необходимого значения, после чего поток подается в фильтр 3, в котором выполняется его очистка от механических примесей, из которого затем поступает во входной патрубок вихревой трубы 4, при этом значения температуры и давления потока на данном участке контролируются при помощи, соответственно, термопары 5 и манометра 6. В вихревой трубе поток сжатого воздуха попадает в камеру энергоразделения, где создается эффект вихря, при этом исходный поток разделяется на два потока, имеющих различные значения температуры. В приосевой области создается холодный поток воздуха, а в периферийной, пристеночной области – горячий поток воздуха, которые направляются к противоположно расположенным выходным патрубкам вихревой трубы. Далее холодный и горячий потоки направляются в полости плоских каналов 7, из которых отводятся в окружающую среду. Между плоскими каналами 7, на их конечном участке, зажаты термоэлектрические генераторные модули 8 в количестве 2 шт. Давление, расход, температура указанных потоков на входе в каналы измеряются с помощью, соответственно, манометров 9, ротаметров 10, термопар 11. Значения температуры потоков на выходе из каналов, температуры стенок каналов определяются с помощью термопар, соответственно, 12, 13 и 14. К термоэлектрическим генераторным модулям подключена электрическая нагрузка 15, величина силы тока и напряжения, при этом, измеряется, соответственно, амперметром 16 и вольтметром 17.

**Численное моделирование.** С целью оценки эффективности метода термостатирования поверхностей каналов путем установки в них продольного оребрения с переменной высотой предварительно было выполнено численное моделирование процессов газодинамики и теплообмена, осуществляющихся в указанных каналах. Численное моделирование в специализированных электронных программных комплексах позволяет перед проведением экспериментальных исследований оценить эффективность различных методов интенсификации теплообмена при задании определенных граничных условий и выбрать наиболее результативный, который затем можно верифицировать практически. При этом моделирование способствует сокращению капитальных затрат на изготовление и закупку комплектующих для экспериментальной установки, необходимых для исследований определенного режима, а также эксплуатационных затрат на проведение исследовательских испытаний. К указанному программному обеспечению относятся системы автоматизированного проектирования, позволяющие выполнять трехмерное моделирование деталей и сборок, устройств, а также создавать конструкторскую документацию, и системы, которые используются для решения многих инженерных задач: выполнения расчетов, проведения виртуального компьютерного моделирования различных физических процессов и их последующего анализа [16, 17].

Выполнялось численное моделирование четырех режимов с различными исходными параметрами потоков, каждый из которых включал по три варианта конструкции двух плоских каналов термоэлектрической генераторной установки (для холодного и горячего потоков):

(а) базовую конструкцию (полый канал), (б) с установкой в полости каналов продольных ребер с фиксированной высотой, (в) с оребрением стенок каналов, контактирующих с ТГМ, продольными ребрами с изменяющейся высотой по ходу движения потока.

Оребрение выполнялось непосредственно в области установки термоэлектрических генераторных модулей, соединенных между собой последовательно, при этом длина участков каналов, контактирующих с указанными модулями составляет 88 мм.

Чертежи канала холодного потока, включающие геометрические характеристики оребрения фиксированной и переменной высоты, представлены на рис. 2 – рис. 4. Толщина ребер 2 мм.

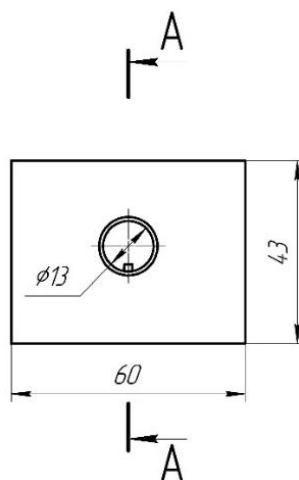


Рис. 2. Вид канала холодного потока со стороны входного патрубка

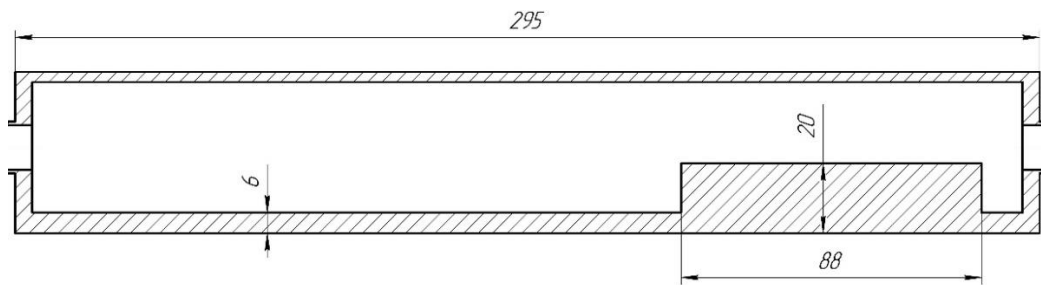


Рис. 3. Канал холодного потока при оребрении стенки ребрами с фиксированной высотой

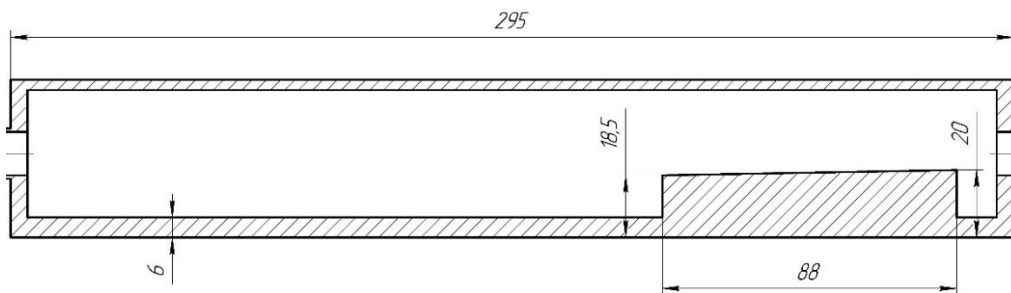


Рис. 4. Канал холодного потока при оребрении стенки ребрами с переменной высотой

Трехмерная модель канала холодного потока, в которой показана схема установки ребер, изображена на рис. 5.

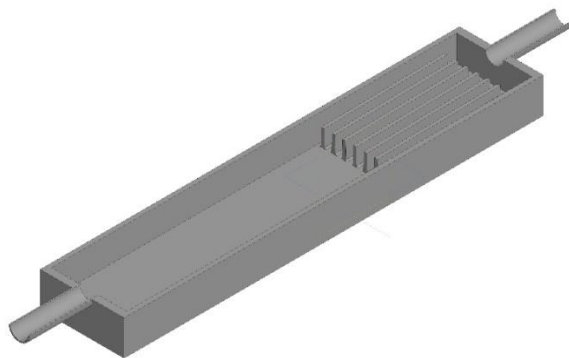


Рис. 5. Трехмерная модель канала холодного потока

Чертежи канала горячего потока, включающие геометрические характеристики оребрения фиксированной и переменной высоты, представлены на рис. 6 – рис. 8.

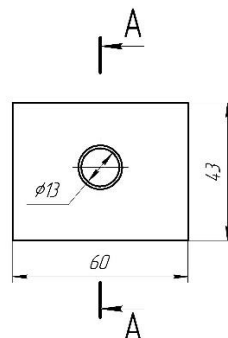


Рис. 6. Вид канала горячего потока со стороны входного патрубка

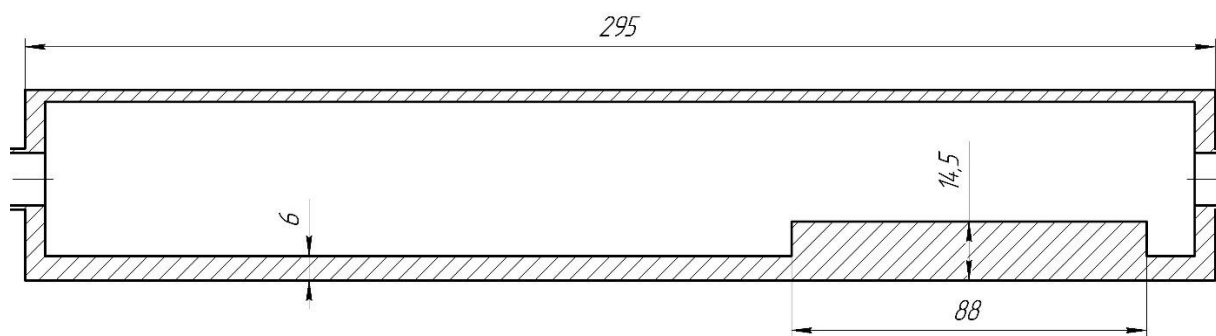


Рис. 7. Канал горячего потока при оребрении стенки ребрами с фиксированной высотой

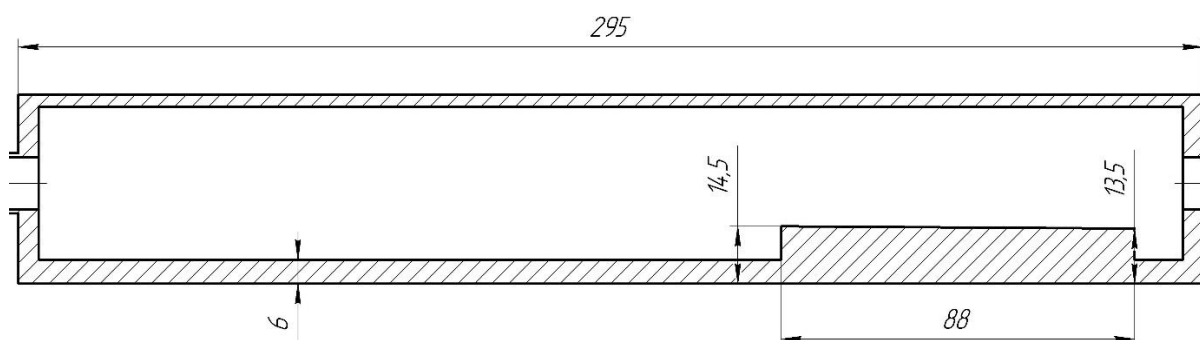


Рис. 8. Канал горячего потока при оребрении стенки ребрами с переменной высотой

Трехмерная модель канала горячего потока, в которой показана схема расположения ребер, значение толщины которых так же равно 2 мм, показана на рис. 9.

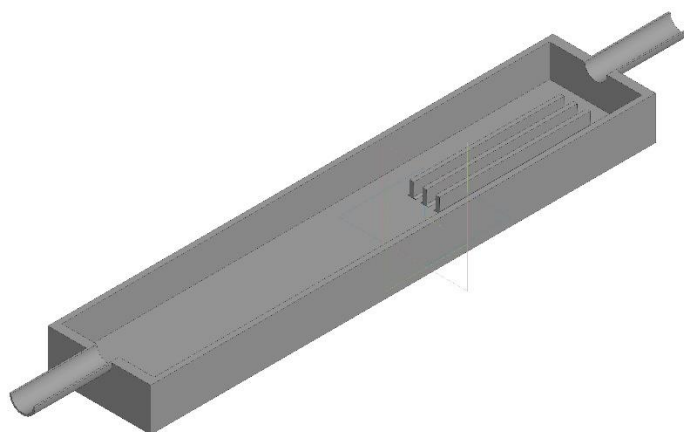


Рис. 9. Трехмерная модель канала горячего потока

При моделировании исходные параметры холодного и горячего потоков были заданы, исходя из характеристик термического разделения в вихревой трубе NexFlow 50040H, полученных в результате экспериментальных исследований ее эффективности, а также с учетом возможности дальнейшей экспериментальной верификации результатов с помощью натурной экспериментальной термоэлектрической генераторной установке.

Распределение температуры холодного потока для трех вариантов конструкции плоского канала представлено на рис. 10 – рис. 12.

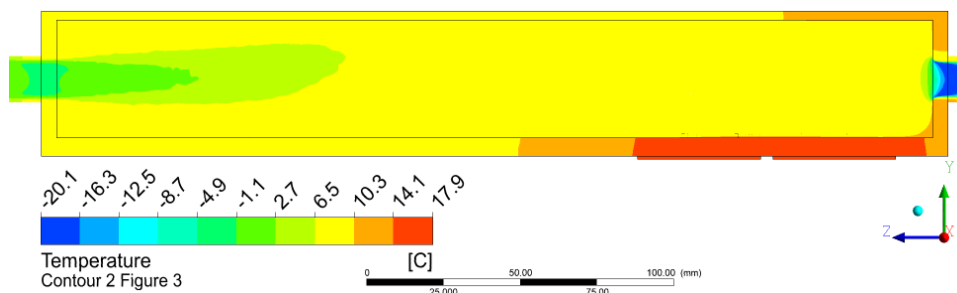


Рис. 10. Распределение температуры холодного потока и температуры стенки при базовой конструкции канала

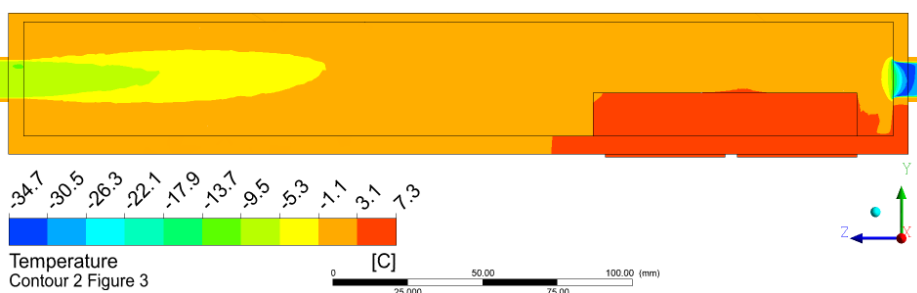


Рис. 11. Распределение температуры холодного потока и температуры стенки при конструкции канала с установкой ребер с фиксированной высотой

Руководствуясь данными, полученными в результате численного моделирования процесса теплообмена при базовом варианте конструкции канала, был выполнен расчет основных параметров, характеризующих процесс теплообмена, а также конструктивных особенностей оребрения переменной высоты. Конечные формулы для определения высоты ребер  $h_x$  и  $h_\Gamma$ , м по координате длины канала  $x$  для каналов холодного и горячего потоков воздуха соответственно выглядят следующим образом:

$$h_x = \frac{P_x}{n_x \lambda_{px} m_x^2 \delta_{px}} \cdot \left[ \frac{q}{(t_{cx} - t'_x) - \frac{q P_x x}{G_x C_{px}}} - \alpha_x \right],$$

$$h_\Gamma = \frac{P_\Gamma}{n_\Gamma \lambda_{p\Gamma} m_\Gamma^2 \delta_{p\Gamma}} \cdot \left[ \alpha_\Gamma - \frac{q}{(t'_\Gamma - t_{c\Gamma}) - \frac{q P_\Gamma x}{G_\Gamma C_{p\Gamma}}} \right],$$

где  $P_x$  и  $P_\Gamma$  – давления холодного и горячего потоков воздуха, Па;  $n_x$  и  $n_\Gamma$  – общее количество ребер в каналах;  $\lambda_{px}$  и  $\lambda_{p\Gamma}$  – коэффициенты теплопроводности ребер, Вт/(м·К);  $m_x = \sqrt{\frac{2\alpha_p}{\lambda_x \delta}}$ ;  $m_\Gamma = \sqrt{\frac{2\alpha_p}{\lambda_\Gamma \delta}}$ ;  $\delta_{px}$  и  $\delta_{p\Gamma}$  – толщина ребра;  $q$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $t_{cx}$  и  $t_{c\Gamma}$  – средняя температура стенки канала, °С;  $t'_x$  и  $t'_\Gamma$  – температура воздушных потоков на входе в канал, °С;  $G_x$  и  $G_\Gamma$  – массовый расход холодного и горячего потоков, кг/с;  $C_{px}$  и  $C_{p\Gamma}$  – теплоемкость потоков, Дж/(кг·К);  $\alpha_x$  и  $\alpha_\Gamma$  – коэффициенты теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К).



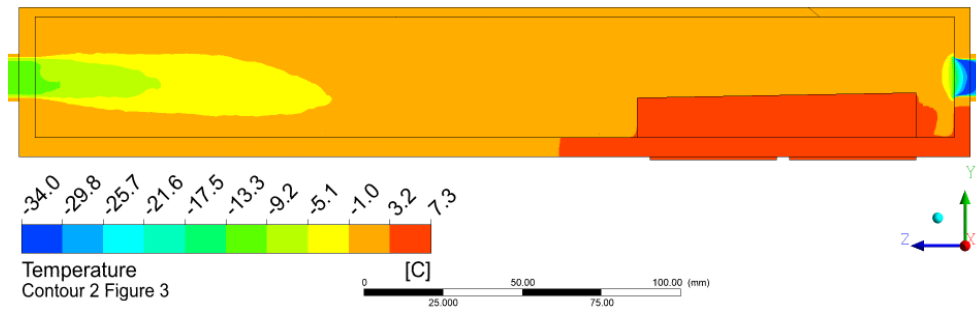


Рис. 12. Распределение температуры холодного потока и температуры стенки при оребрении стенки ребрами с переменной высотой

Как можно заметить из представленных графических результатов моделирования изменения температуры в канале холодного потока, распределение температуры при установке оребрения с переменной высотой выполняется более равномерно и на большей площади поверхности стенки, контактирующей с ТГМ. При этом потери давления при базовой конструкции канала составляют 32330 Па, при конструкции с оребрением с фиксированной высотой – 42060 Па, а при конструкции с оребрением, имеющим переменную высоту – 41680 Па.

Распределение температуры горячего потока для трех вариантов конструкции соответствующего плоского канала представлено на рис. 13 – рис. 15.

Распределение температуры стенки канала, как и в случае с каналом холодного потока, при применении продольных ребер, имеющих переменную высоту, в сравнении с оребрением с фиксированной высотой, осуществляется более равномерно и на большей площади поверхности стенки канала, контактирующей с ТГМ, а в сравнении с базовой конструкцией – возрастает количественное значение переданного тепла. При этом потери давления при базовой конструкции канала составляют 2818 Па, при конструкции с оребрением с фиксированной высотой – 3803 Па, а при конструкции с оребрением, имеющим переменную высоту – 3798 Па.

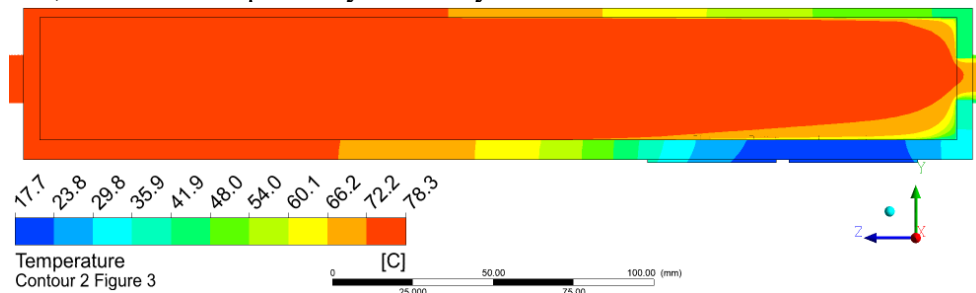


Рис. 13. Распределение температуры горячего потока и температуры стенки при базовой конструкции канала

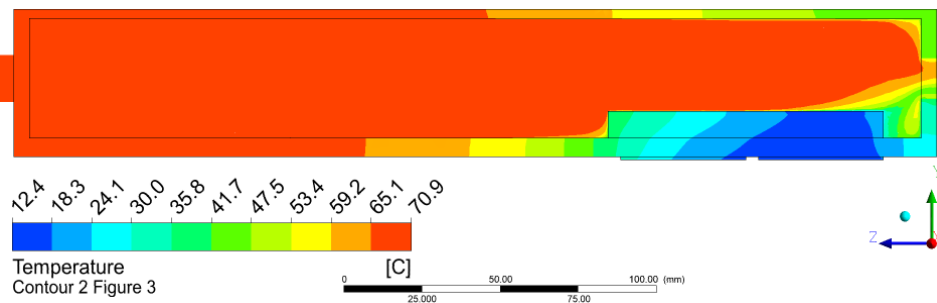


Рис. 14. Распределение температуры горячего потока и температуры стенки при конструкции канала с установкой ребер с фиксированной высотой

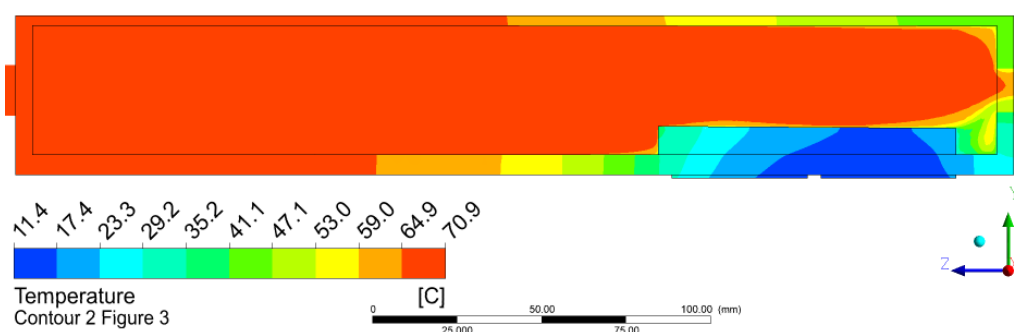


Рис. 15. Распределение температуры горячего потока и температуры стенки при оребрении стенки ребрами с переменной высотой

Таблица 1. Значения полезной тепловой мощности

Режим	Тип канала	Конструкция канала		
		Базовая	Оребрение с фиксированной высотой	Оребрение с переменной высотой
		Полезная тепловая мощность, Вт		
1	Холодного потока	12,96	16,64	17,28
	Горячего потока	58,56	63,68	64,64
2	Холодного потока	17,12	17,92	18,24
	Горячего потока	63,68	68,16	68,48
3	Холодного потока	21,52	35,2	38,4
	Горячего потока	67,2	71,84	72,0
4	Холодного потока	17,44	18,56	18,88
	Горячего потока	69,44	82,56	83,2

Не менее важным параметром при исследовании эффективности термостатирования поверхности стенок каналов, контактирующих с ТГМ, является полезная тепловая мощность, переданная термоэлектрическим модулям и затем принятая холодным потоком. Данный параметр был определен при помощи программного комплекса, в котором выполнялось численное моделирование процесса теплообмена. Значения полезной тепловой мощности для четырех смоделированных режимов, в каждом из которых было выполнено моделирование теплообмена в трех конструкциях канала холодного потока и в трех конструкциях канала горячего потока, представлены в таблице 1.

Как видно из таблицы, количество тепла, переданное от горячего потока термоэлектрическим модулям и в последствии принятое холодным потоком, для каналов, в которых установлено оребрение с переменной высотой, имеет максимальное значение, по сравнению с другими вариантами конструкции.

**Выводы.** Таким образом, руководствуясь полученными данными численного моделирования процесса теплообмена при исследовании методов термостатирования поверхности каналов термоэлектрической генераторной установки, можно сделать вывод о том, что оснащение стенок каналов ребрами, имеющими переменную высоту, способствует увеличению переданной термоэлектрическим генераторным модулям тепловой мощности с обеспечением более равномерного распределения теплового потока по поверхности, что, в свою очередь, будет способствовать повышению эффективности генерации электроэнергии, при этом потери давления, по сравнению с базовым вариантом, возрастают не существенно.

**СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Семенов, В. С. Способы прямого преобразования тепловой энергии в электрическую / В. С. Семенов, А. В. Бейльман, И. В. Трифанов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2015. – Т. 2, № 11. – С. 124-126.
2. Белоусов, А. М. Исследование возможностей повышения энергоэффективности вихревой трубы Ранка – Хилша / А. М. Белоусов, И. Х. Исрафилов, С. И. Харчук // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2015. – № 7-2. – С. 112-121.
3. Васильев, П. Ф. Применение термоэлектрических генераторов в условиях Крайнего Севера / П. Ф. Васильев, М. Л. Корякина // Энергетические системы. – 2017. – № 1. – С. 363-367.
4. Lukowicz, M. V. Thermoelectric generators on satellites—An approach for waste heat recovery in space / M. V. Lukowicz, E. Abbe, T. Schmiel // Energies. – 2016. – V. 9. – №. 7. – P. 541.
5. Базыкин, Д. А. Численное моделирование теплообмена и вариантов его интенсификации в профилированных каналах термоэлектрической генераторной установки / Д. А. Базыкин, С. В. Дахин, А. В. Бараков // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2024. – № 1. – С. 82-92. – DOI 10.5281/zenodo.10974658. – EDN YKNZGR.
6. Виноградов, С. В. Модельная экспериментальная установка с термоэлектрическим генератором / С. В. Виноградов, К. Р. Халыков, Д. Н. Конг // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2010. – № 2. – С. 66-70.
7. Шостаковский, П. Современные термоэлектрические источники питания электронных устройств / П. Шостаковский // Компоненты и технологии. – 2015. – № 1(162). – С. 90-95.
8. Лемминг, А. Э. Решение задач энергетического обеспечения автономных объектов на основе термоэлектрических модулей / А. Э. Лемминг, П. Г. Шостаковский // Инновации. – 2018. – № 5(235). – С. 9-13.
9. Хабиров, Ф. Ф. Оценка возможности применения термоэлектрического преобразователя пельтье в котельных для нужд АПК / Ф. Ф. Хабиров, В. С. Вохмин, Я. Д. Осипов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2021. – № 1(195). – С. 115-121.
10. Хабиров, Ф. Ф. Разработка термоэлектрического генератора для слаботочных систем сельскохозяйственных предприятий / Ф. Ф. Хабиров, Вохмин В. С. // АПК России. – 2022. – Т. 29, № 4. – С. 490-499.
11. Дахин, С. В. К определению параметров оребрения при термостатировании поверхности теплообмена в условиях конвективной теплоотдачи / С. В. Духин // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2018. – Т. 14, № 6. – С. 87-91.
12. Pathak, K. K. A numerical study of natural convective heat transfer from a shrouded vertical variable height non-isothermal fin array / K. K. Pathak, A. Giri, P. Lingfa // Applied Thermal Engineering. – 2018. – V. 130. – P. 1310-1318.
13. Al-Sarkhi, A. Comparison between variable and constant height shrouded fin array subjected to forced convection heat transfer / A. Al-Sarkhi // International communications in heat and mass transfer. – 2005. – V. 32. – №. 3-4. – P. 548-556.
14. Золотоносов, А. Я. Математическая модель теплопроводности в длинном ребре переменной высоты с учетом изменения условий теплообмена / А. Я. Золотоносов, Я. Д. Золотоносов, Т. В. Белавина // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2009. – № 2(12). – С. 190-196.
15. Huang, X. Performance analysis and design optimization of heat pipe sink with a variable height fin array under natural convection / X Huang, C Shi, J Zhou [et al.] // Applied Thermal Engineering. – 2019. – V. 159. – P. 113939.
16. Денисов, М. А. Математическое моделирование теплофизических процессов. ANSYS и CAE-проектирование: учебное пособие / М. А. Денисов. – Екатеринбург: Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2011. – 149 с.
17. Lee, Y-L. Metal Fatigue Analysis Handbook: Practical problem-solving techniques for computer-aided engineering / Y-L. Lee, M. E. Barkey, H-T. Kang. – ButterworthHeinemann, Elsevier Inc., 2011. – 632 p.

*Поступила в редакцию 14.06.2024 г., рекомендована к печати 03.09.2024 г.*

**RESULTS OF HEAT TRANSFER NUMERICAL SIMULATION DURING THERMOSTATING OF THE SURFACE OF THE CHANNELS OF THE THERMOELECTRIC GENERATOR PLANT**

*Bazykin D.A., Orekhov E.A., Dakhin S.V.*

The article discusses the problem of reducing the efficiency of electricity generation by a thermoelectric generator set due to changes in the temperature of cold and hot air flows as they move inside flat channels, the solution to which is to ensure uniformity of the temperature field or thermostat the surface of the channel walls, which can be done by installing channels in the cavity longitudinal fins with variable height. A schematic diagram of the developed experimental installation is shown, the principle of its operation is described, the results of numerical modeling of heat transfer in channels with their basic design are presented, when fins with a fixed height and fins with a variable height are installed in them, they are compared, and the calculated values of the useful thermal power for each are given from the options.

**Keywords:** thermoelectric generator modules, Seebeck effect, Ranque-Hilsch effect, experimental setup, variable height fins, numerical modeling, heat transfer, flat channels.

**Базыкин Денис Александрович**

аспирант кафедры теоретической и промышленной теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»,  
Российская Федерация, г. Воронеж.  
E-mail: bazykin.denis@yandex.ru

**Bazykin Denis Aleksandrovich**

Postgraduate student at Department of Theoretical and Industrial Thermal Power Engineering of Voronezh State Technical University,  
Russian Federation, Voronezh.

**Орехов Евгений Александрович**

начальник бюро расчетов ООО ФПК «Космос-Нефть-Газ»,  
Российская Федерация, г. Воронеж.

**Orekhov Evgenii Aleksandrovich**

Head at the settlement bureau of Financial & Industrial Company «Kosmos-Neft-Gas»,  
Russian Federation, Voronezh.

**Дахин Сергей Викторович**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теоретической и промышленной теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»,  
Российская Федерация, г. Воронеж.  
E-mail: svdakhin@ya.ru

**Dakhin Sergei Viktorovich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of Theoretical and Industrial Thermal Power Engineering of Voronezh State Technical University,  
Russian Federation, Voronezh.

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

© 2024 Косорлуков И.А., Соловьев А.В., Тимченко М.С., Строчков А.В.

Одним из ключевых направлений современного развития электроэнергетики в России является цифровизация, развитие которой привело к появлению концепции «Цифрового РЭС». В то же время на практике эта концепция как правило ограничена достаточно узким набором мероприятий, а именно модернизацией оборудования, секционированием сети, улучшением сетей связи и внедрением «умного» учёта. Авторами статьи предлагается новая концепция («Интеллектуальная система управления процессами электроснабжения»), в основу которой положен объектно-ориентированный принцип. Эта концепция позволяет не просто модернизировать электрическую сеть, а изменяет сам подход к её построению, делая её интеллектуальной, надёжной и эффективной. Дано краткое описание архитектуры системы, наборов основных функций и структуры единичного элемента системы.

**Ключевые слова:** распределительные электрические сети, цифровой РЭС, Smart Grid, цифровизация, автоматизация, объектно-ориентированный принцип.

**Введение.** Согласно Указу Президента Российской Федерации от 18 июня 2024 г. № 529 первым приоритетным направлением научно-технологического развития является высокоэффективная и ресурсосберегающая энергетика. Одним из ключевых способов повышения эффективности энергетики в современных реалиях является цифровизация, что обуславливает высокий интерес к современным цифровым технологиям в энергетике. Развитие технологий автоматизации и современных способов передачи данных сделало возможным создание систем управления электрическими сетями, максимально использующих цифровую среду. На базе программно-аппаратных комплексов реализованы системы управления, использующие цифровые каналы для связи с системами подстанций, реализованы сбор и хранение текущих рабочих параметров объектов электроснабжения и регистрации аварийных событий, имеются решения по мониторингу ветровой и гололедной нагрузки линий электропередач для адаптивной плавки гололеда, методы определения мест повреждения и аппаратная реализации противоаварийных систем, системы учета и диспетчеризации [1] и т.д. Все перечисленные выше технические решения можно объединить общей концепцией «Цифровых РЭС» (отметим, что в литературе аналогичные по своей сути и наполнению концепции могут обозначаться и другими терминами, такими как «активно-адаптивная распределительная сеть» [2], «высокоавтоматизированный РЭС» [3], «реконфигурируемая распределительная сеть» [4] и т.п.). В то же время современные способы построения «Цифровых РЭС» (далее ЦРЭС), как правило, сводятся лишь к модернизации и цифровизации методов передачи данных для систем телемеханики, устройств релейной защиты и автоматики или замены аналоговых сигналов на цифровые в классических системах электроснабжения [5]. В целом, предлагаемые в рамках концепции ЦРЭС решения часто ограничены довольно узким набором несвязанных программно-технических решений, таких как применение «умных» счетчиков [6], современных реклоузеров для секционирования сети [7] или их комбинации [2]. Опыт практической реализации проектов ЦРЭС [2, 8, 9] показывает, что они в конечном счете ограничиваются только этими техническими решениями, дополняемыми на завершающих этапах реализации проектов соответствующими программными решениями.

Но и эти программные решения по своей сути являются лишь модернизацией и обновлением программной части систем АСУ ТП и АСКУЭ. Конечно же, такой подход к концепции ЦРЭС не является абсолютно неэффективным и имеет свои результаты. Так, заявляется снижение потерь в пределах 5 – 10 % и улучшение показателей SAIDI (эквивалентная продолжительность перерывов в электроснабжении на одного потребителя) и SAIFI (эквивалентная частота перерывов в электроснабжении на одного потребителя) в пределах 50 – 75 % [8, 9]. Несмотря на это, можно с уверенностью утверждать, что для достижения наибольшего эффекта в части повышения надежности, эффективности и экономичности распределительной сети необходима выработка совершенно нового подхода к построению ЦРЭС, который авторы настоящей статьи предлагают именовать как «Интеллектуальная система управления процессами электроснабжения» (далее – ИСУПЭ).

**Определение предлагаемой системы.** Основной функциональной особенностью описанных выше принципов построения ЦРЭС является однообъектный подход к решению общих задач на объектах генерации и трансформации электрической энергии (станциях и подстанциях). Для перехода к новой интеллектуальной системе в глобальном разрезе систем электроснабжения от генерации до конечного потребителя, необходимы новые методы её построения, минимизирующие требования к сетям передачи данных и использованием унифицированного оборудования и/или существующих систем ЦРЭС. Так, для создания ИСУПЭ предлагается заменить методы построения ЦРЭС, на метод создания объектно-ориентированной структуры элементов, взаимодействующих через информационное поле и бинарную логику. Кроме того, интеллектуальная система управления процессами электроснабжения (ИСУПЭ) представляет собой высокоавтоматизированную систему с применением машинного обучения и глубокой степенью автономности и свободы принятий решений. Она включает в себя совокупность элементов передачи и распределения электрической энергии, связанных физически и информационно и объединённых по объектно-ориентированной архитектуре через информационное поле, построенное по бинарной логике. Далее рассмотрим структуру системы подробнее.

**Объектно-ориентированная архитектура ИСУПЭ.** Ключевая особенность ИСУПЭ заключается в применении объектно-ориентированного принципа её организации. Такой подход позволяет разложить сложные системы электроснабжения на более простые составные объекты: АБОНЕНТ, ПОДСТАНЦИЯ, ЛИНИЯ и т.д., каждый из которых будет связан с другими объектами лишь небольшим объёмом взаимодействий. ОБЪЕКТ является базовым единичным звеном в структуре системы. Каждый из объектов относится к определенному КЛАССУ, определяющему функциональное назначение объекта и его место в общей иерархии системы и набор его ФУНКЦИЙ. Здесь следует отметить, что объектно-ориентированный принцип сам по себе не является совершенно чуждым для современной электроэнергетики явлением. Некоторые элементы такого подхода в том или ином виде содержатся в серии стандартов МЭК 61850, описывающих принципы построения цифровых подстанций. В частности, документ TR 61850-90-6 [10] посвящен автоматизации распределительных сетей и информационному обмену в них. Однако в целом ряд стандартов МЭК 61850 использует применение объектно-ориентированных принципов на уровне отдельных устройств защиты и автоматики (обозначаемых в пределах документов стандарта как «интеллектуальное электронное устройство» или «ИЭУ»), разделяя их на отдельные логические устройства, типовые функции (логические узлы) и классы данных для осуществления информационного обмена, и на уровне отдельной подстанции, в которой выделяется уровень процесса, уровень присоединения и уровень станции. Описываемая же в настоящей работе ИСУПЭ предлагает распространить объектно-ориентированный подход на всю электрическую сеть.

Средой, посредством которой будут осуществляться взаимодействия между объектами в ИСУПЭ, является информационное поле. Информационное поле является средой передачи бинарной информации, формирующейся в элементах системы электроснабжения, производящих логические потоки данных на основе состояния элементов, измерений и коммутаций. Основой для формирования данных является матрица состояния элемента, т.е. текущих значений измеряемых величин, положения контактов и т.д. Применение матриц состояния вместо традиционного информационного обмена в виде отдельных дискретных и аналоговых сигналов или цифровой передачи этих сигналов позволит упростить информационный обмен и повысить надежность передачи информации путем замены наборов сигналов на одну матрицу, состоящую из набора бинарных состояний этих сигналов.

**Структура ИСУПЭ и ее функции.** Для работы системы необходимо иметь набор функциональных возможностей, позволяющих обеспечить систему требуемым объемом информации для принятия решений и выработки воздействий на систему электроснабжения, обеспеченную обменом данными внутри и вне системы. На рисунке 1 представлена структурно-функциональная схема построения ИСУПЭ, визуальное описание взаимодействия элементов и функций элементов системы. ИСУПЭ имеет архитектуру, построенную по объектно-ориентированному принципу. Так, любой ОБЪЕКТ (потребитель, реклоузер, ячейка и т.д.) имеет свои СВОЙСТВА (наименование, расположение, мощность и т.д.) и ФУНКЦИИ (мониторинговые, алгебраические, логические, функции управления) и входит в свой КЛАСС (Уровень I, Уровень II и т.д.). Класс объекта зависит от его положения в иерархии системы и примерно соотносится с классом напряжения. При этом ОБЪЕКТЫ (рисунок 2), имеющие связи с другими ОБЪЕКТАМИ того же КЛАССА, могут взаимодействовать с ФУНКЦИЯМИ друг друга, формируя матрицу состояния системы, а ОБЪЕКТЫ, находящиеся на границах КЛАССОВ передавать таблицы состояния с нижнего КЛАССА на верхний, тем самым обеспечивая наследование информации. Взаимодействовать с ФУНКЦИЯМИ ОБЪЕКТА может любой ОБЪЕКТ, имеющий с ним связь. Так вся информация находится в информационном поле системы и может быть доступна любому ОБЪЕКТУ. КЛАСС Уровня IV взаимодействует с информационным полем и вносит изменения в него на основании результатов интеллектуальной обработки данных, при этом изменения в информационном поле автоматически влияют на ОБЪЕКТЫ и КЛАССЫ через их ФУНКЦИИ.

Функции ИСУПЭ представлены следующими группами: интеллектуальные функции, мониторинговые функции, функции управления, функции связи, серверные функции, функции обработки данных. Рассмотрим их подробнее.

**Интеллектуальные функции.** Функции этой группы реализуются при помощи специальных модулей, которые целесообразно размещать на системообразующих объектах генерации таких как ТЭЦ, ГЭС, АЭС и т.д. или же на распределительных подстанциях напряжением 110-750 кВ. Интеллектуальные модули играют роль центрального узла системы и осуществляют следующие функции: 1. Сбор мониторинговых данных и формирование конфигурации ИСУПЭ на их основе; 2. Синтез логических цепочек защит и управляющих воздействий; 3. Прямое и косвенное взаимодействие с функциями управления; 4. Определение алгоритмов взаимодействий элементов, конфигурации потоков передачи данных; 5. Формирование оптимальной конфигурации схем электроэнергетических систем; 6. Прогнозирование

профилактических и ремонтно-эксплуатационных мероприятий; 7. Обмен данными с внутренними и внешними источниками информации; 8. Взаимодействие с серверной функцией, работа с базами данных; 9. Прочие функции, требующие принятия интеллектуальных решений и формирования сигналов.

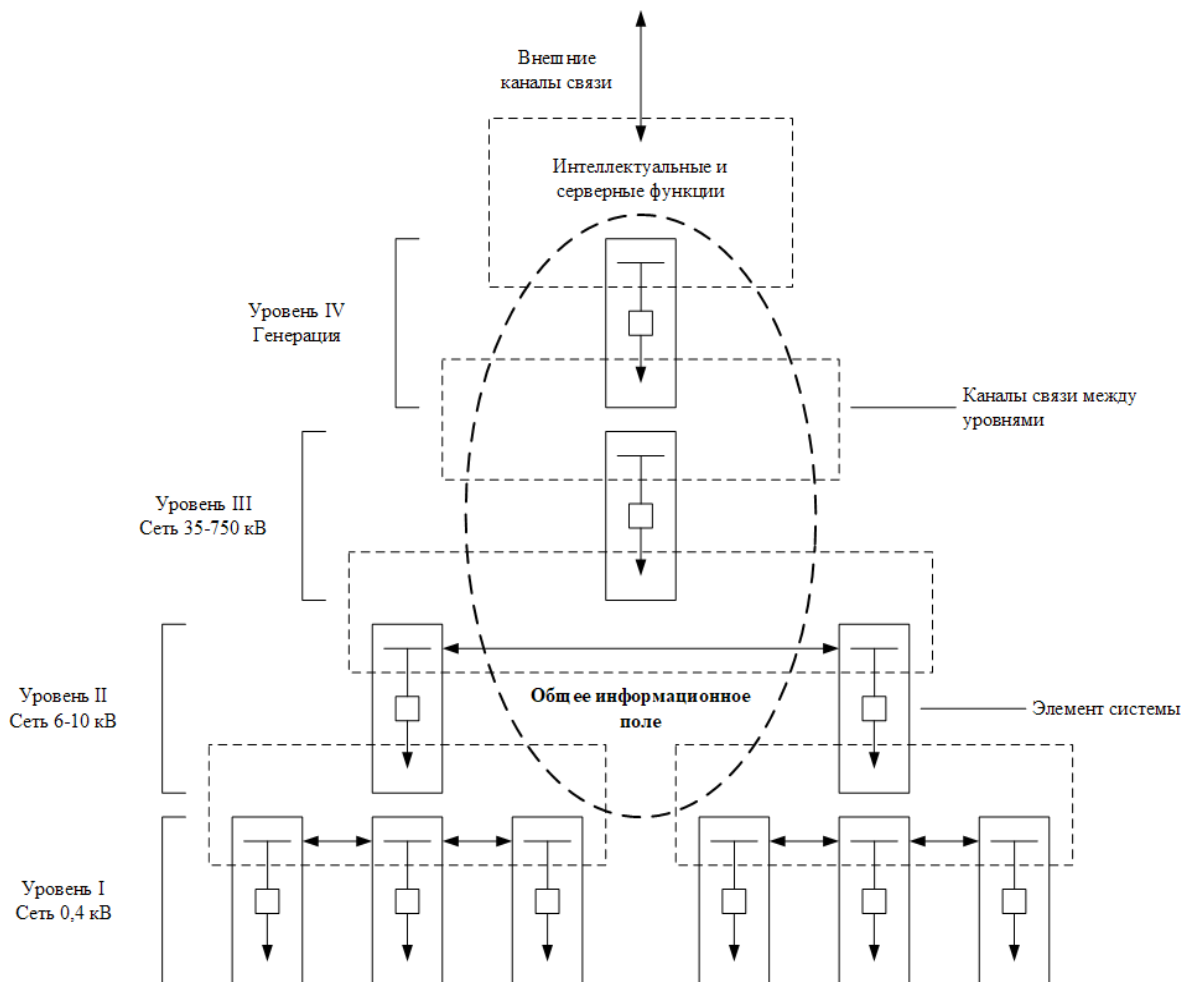


Рис. 1. Структурно-функциональная схема построения ИСУПЭ

**Мониторинговые функции.** Функции этой группы включают в себя измерение физических величин элементов системы электроснабжения и устройств различного назначения и прочих параметров системы, влияющих на ее состояние. В качестве таких величин могут выступать как электрические, так и неэлектрические величины, такие как положения контактов оборудования, нагрузка от тяжения проводов, температура элементов системы электроснабжения систем и окружающей среды и т.д. Далее эти значения путем преобразования и обработки переходят в данные состояния энергосистемы и формируют общее информационное поле.

**Функции обработки данных.** Данная группа включает в себя математические и логические операции над измеряемыми величинами. Также они определяют способность системы производить логические вычисления и формировать структуру взаимосвязей событий при различных значениях свойств объектов и заполнять логические матрицы состояния элементов системы электроснабжения с последующим преобразованием в бинарную информацию.



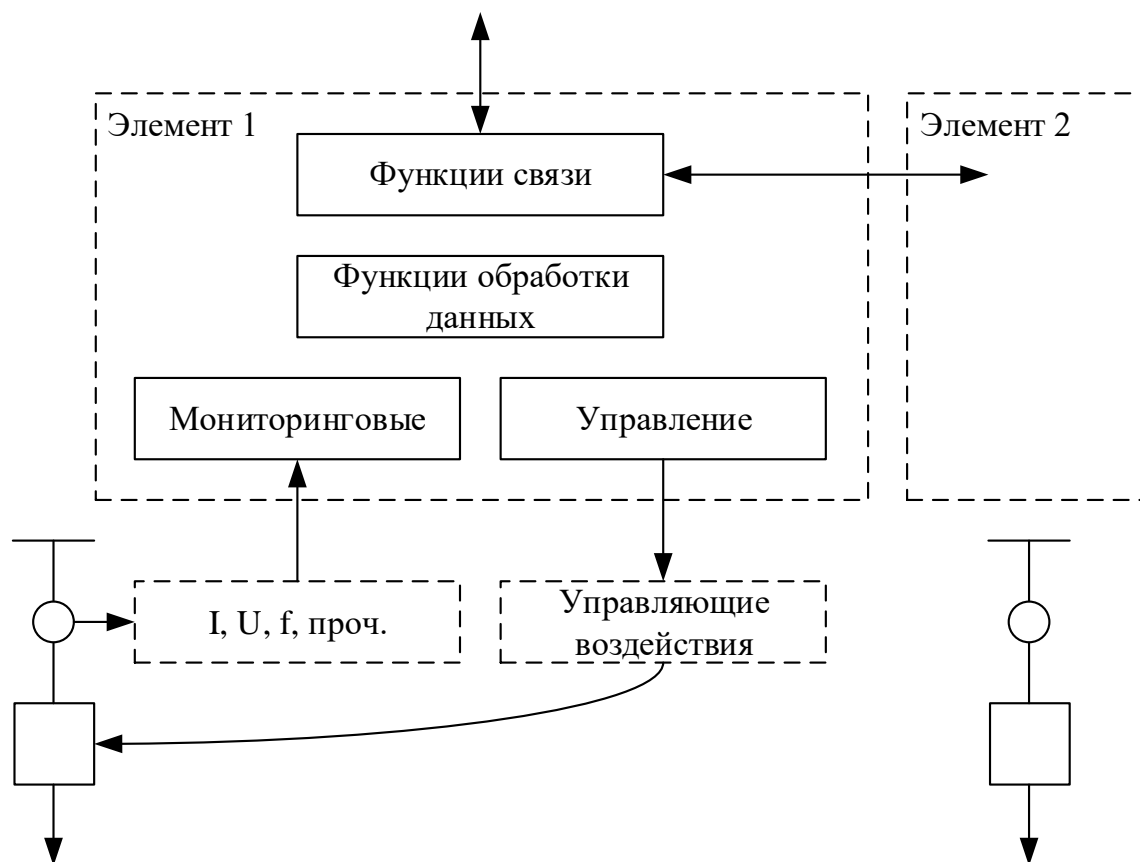


Рис. 2. Структура элемента (объекта) системы

**Функции связи.** Функции этой группы отвечают за формирование системы передачи данных в информационном поле. Для ИСУПЭ используется любые возможные пути передачи данных и каналы связи. При этом система связи должна осуществлять связь между всеми элементами и также связь с внешними по отношению к ИСУПЭ системами, что в свою очередь позволит создать информацию среду ИСУПЭ минимизируя последствия потери доступа к тому или иному каналу связи. Кроме того, возможно использовать информацию о состоянии сети между элементами ИСУПЭ для определения конфигурации системы электроснабжения и косвенных показателях работоспособности её элементов.

**Функции управления.** Эти функции позволяют осуществлять команды переключения коммутационных аппаратов как через информационное поле, так и без внешнего вмешательства. Это необходимо в первую очередь для формирования оптимальной системы электроснабжения, управляя коммутационными элементами, входящими в эту систему, и иных воздействий на участки сети или оборудование, находящееся в аномальном состоянии. Производить отключения участков сети для проведения эксплуатационных мероприятий.

**Серверные функции.** Функции этой группы используются для: 1. Поиска, обработки и хранения больших массивов информации; 2. Административной деятельности; 3. Обеспечения безопасности хранимых данных и прочей информации и предотвращения несанкционированного доступа к системе.

**Выводы.** Объектно-ориентированный подход к формированию автоматизированных систем и использование логических структур для формирования взаимосвязей событий при различных значениях показателей, позволяет минимизировать требования к качеству сетей передачи данных, а использование глубокой степени автономности и свободы принятий решений элементов системы, позволяют уменьшить время работы систем противоаварийной автоматики и уменьшить влияние аномальных режимов работу энергосистемы и эксплуатационные характеристики оборудования. Описанный подход к формированию Интеллектуальной системы управления процессами электроснабжения, имеет положительные отличия от существующих и разрабатываемых систем ЦРЭС и может стать основой для разработки элементной базы и формирования концепции развития сети нового поколения.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Савельев, В. А. Интеллектуальные системы учета и диспетчеризации - одна из базовых составляющих "цифровых" РЭС / В. А. Савельев, С. А. Егоров, П. М. Зубряков // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Международный научный семинар им. Ю.Н. Руденко: В 2-х книгах, Иркутск, 01–07 июля 2018 года / Ответственный редактор Воропай Н.И.. Том Выпуск 69, Книга 2. – Иркутск: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, 2018. – С. 119-128.
2. Анализ подходов к рациональному размещению оборудования, обеспечивающего переход к цифровой активно-адаптивной распределительной сети 6-20/0,4 кВ / В. Смирнов, Е. Мыльников, Н. Калинин, Н. Чернов // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2020. – № S2(17). – С. 30-36.
3. Лебедев, А. А. Концепция построения и полигон для отработки технологий создания высокоавтоматизированных РЭС и микроэнергосистем / А. А. Лебедев, А. А. Волошин, А. Н. Леднев // Релейщик. – 2023. – № 2(46). – С. 22-26.
4. Шарыгин, М. В. Автоматизация расчета адаптивной многопараметрической релейной защиты для реконфигурируемых распределительных сетей / М. В. Шарыгин, А. Л. Куликов, А. А. Фальков // Релейщик. – 2022. – № 1(42). – С. 12-16.
5. Повышение эффективности и надежности РЗА цифровых подстанций и цифровых РЭС / А. В. Мокеев, С. А. Пискунов, Д. Н. Ульянов, Е. И. Хромцов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2020. – Т. 12, № 3(47). – С. 92-100.
6. Решения АО ГК "Системы и Технологии" в рамках концепции Цифровой РЭС // Энергоэксперт. – 2018. – № 4(68). – С. 22-23.
7. Кабаков, А. И. Цифровизация распределительных сетей 6-10 кВ / А. И. Кабаков, С. В. Пономарев // Наноиндустрия. – 2020. – Т. 13, № S5-1(102). – С. 162-165. – DOI 10.22184/1993-8578.2020.13.5s.162.165.
8. Кузьмин, И. Цифровой РЭС на базе Северного РЭС ПАО "Ленэнерго" / И. Кузьмин, Н. Магдеев, Ю. Гулим // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2018. – № S4(11). – С. 2-6.
9. НТИ «Энерджинет». Концепция проекта «Цифровой РЭС». Опыт реализации: Янтарьэнерго [Электронный ресурс]. – URL: <https://digitalsubstation.com/wp-content/uploads/2017/11/Tavrida-Elektrik-EnergyNet-TSPS-Kontseptsiya-TSRES.pdf> (дата обращения: 07.07.2024).
10. IEC TR 61850-90-6:2018. Communication networks and systems for power utility automation - Part 90-6: Use of IEC 61850 for Distribution Automation Systems [Электронный ресурс] / Webstore. International Electrotechnical Commission [сайт]. – URL: <https://webstore.iec.ch/publication/61610> (дата обращения: 07.07.2024).

*Поступила в редакцию 11.07.2024 г., рекомендована к печати 04.09.2024 г.*

SMART POWERGRID CONTROL SYSTEM

*Kosorlukov I.A., Solovev A.V., Timchenko M.S., Strochkov A.V.*

In Russia a significant attention is dedicated towards digitalization of power industry which has led to the development of a «Digital Distribution Zone» concept. However, practical implementations of it are usually limited to a narrow scope of measures, i.e. equipment overhauling, network segmentation, communication systems enhancements and implementation of «smart» metering. The authors of this paper propose a new concept based on the object-oriented principle, which facilitates a novel approach towards modern power grid development, making it smart, robust and effective. A brief description of the system's architecture is provided, along with an outline of its basic elements and functions.

**Keywords:** distribution networks, digital distribution zone, smart grid, digitalization, automation, object-oriented approach.

**Косорлуков Игорь Андреевич**

кандидат технических наук, заведующий кафедрой автоматизированных электроэнергетических систем, доцент ФГБОУ ВО «Самарский государственный университет», Российская Федерация, г. Самара.  
E-mail: kosorlukov@gmail.ru

**Kosorlukov Igor Andreevich**

Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Automated electric power systems, Assistant Professor of Samara State Technical University, Russian Federation, Samara.

**Соловьев Александр Владимирович**

ведущий инженер кафедры автоматизированных электроэнергетических систем ФГБОУ ВО «Самарский государственный университет», Российская Федерация, г. Самара.

**Solovev Aleksandr Vladimirovich**

Lead Engineer at Department of Automated electric power systems of Samara State Technical University, Russian Federation, Samara.

**Тимченко Максим Сергеевич**

кандидат технических наук, ведущий инженер кафедры автоматизированных электроэнергетических систем ФГБОУ ВО «Самарский государственный университет», Российская Федерация, г. Самара.  
E-mail: mairon@mail.ru

**Timchenko Maksim Sergeevich**

Candidate of Technical Sciences, Lead Engineer at Department of Automated electric power systems of Samara State Technical University, Russian Federation, Samara.

**Строчков Алексей Владимирович**

аспирант кафедры автоматизированных электроэнергетических систем ФГБОУ ВО «Самарский государственный университет», Российская Федерация, г. Самара.  
E-mail: wormslabs@yandex.ru

**Strochkov Aleksei Vladimirovich**

Postgraduate student at Department of Automated electric power systems of Samara State Technical University, Russian Federation, Samara.

## КОСВЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕТАЛЛА НА ОСНОВАНИИ АНАЛИЗА ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ЧЕРНОВОЙ КЛЕТИ ПРОКАТНОГО СТАНА

© 2024 Турулина Ю.О., Бирюков А.Б., Сидоров В.А.

---

Предлагается расчётный метод определения температуры металла на основании анализа энергосиловых параметров черновой клетки прокатного стана. Метод позволяет определить среднемассовую температуру заготовки в клетке в зависимости от тока двигателя. Реализация данной разработки в режиме реального времени позволяет контролировать рациональность установленных параметров температурного режима печи.

**Ключевые слова:** прокатный стан, среднемассовая температура металла, косвенный метод, предел прочности, идентификация.

---

**Введение.** В рамках прокатного производства особо важную роль играет тепловая обработка материалов, характеризующаяся высоким потреблением природного газа.

Для повышения пластичности и снижения прочности при проведении процессов горячей пластической деформации металл необходимо нагреть выше 0,65 от абсолютной температуры плавления. Однако при температуре близкой к температуре плавления возникает полная потеря пластичности (пережог) из-за процесса окисления и оплавления границ зёрен, а также нарушения связей между ними. Ниже температуры пережога лежит зона перегрева, которая заключается в резком росте размеров зёрен и снижении механических свойств деформированных изделий [1]. Таким образом, во избежание пережога, перегрева, а также трещин и разрывов для каждого сортамента стали необходимо соблюдать свой строго определенный температурный интервал горячей обработки давлением.

Резервом для сокращения расхода топлива и получения продукта надлежащего качества служит совершенствование режимов нагрева, обеспечивающих заданную температуру и равномерность прогрева металла [2, 3].

Определение режимных параметров нагревательных печей осуществляется с помощью метода термометрирования или путем построения математических моделей.

С помощью метода термометрирования возможно получить данные о температурном профиле заготовки непосредственно в момент ее нагрева. Измерения осуществляются за счет закрепленных внутри заготовки термопар или с помощью многоканального регистратора данных.

Периодичность процессов измерений накладывает существенные ограничения при использовании метода термометрирования. В связи с этим большое распространение получило математическое моделирование процесса нагрева.

В зависимости от цели моделирования существуют различные математические модели и методики расчета: модели, базирующиеся на решении уравнения теплопроводности [4]; модели, базирующиеся на тепловой диаграмме И.Д. Семикина [5]; расчетно-экспериментальные методы [6-8] и прочее. Данные методики могут использоваться при выполнении поверочных расчетов для существующих тепловых режимов нагревательных печей, при разработке новых более экономичных режимов, а также для проектирования технологических карт нагрева.

Важной задачей является развитие косвенных способов идентификации температурного состояния металла, выходящего из нагревательных печей.

Одним из способов решения этой задачи является анализ энергосиловых параметров оборудования обработки металла давлением (ОМД).

Целью данной работы является разработка простого и надежного способа идентификации среднemasсовой температуры сортовых заготовок, полученного при их нагреве в печи с шагающими балками, на основании анализа текущих энергосиловых параметров первой клетки прокатного стана.

**Методика косвенного определения температуры металла на основании анализа энергосиловых параметров черновой клетки прокатного стана.** Рассмотрим метод идентификации среднemasсовой температуры сортовых заготовок, полученной при их нагреве в печи с шагающими балками на основании анализа текущих энергосиловых параметров первой клетки прокатного стана. Температура заготовки в клетке определяется в зависимости от тока двигателя.

Методика сводится к следующему.

Мощность двигателя определяется значением тока двигателя:

$$N = 1,73 \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi, \quad (1)$$

где  $N$  – мощность двигателя, кВт;

$U$  – напряжение питания (двигатель постоянного тока), В;

$I$  – ток при прокатке, А;

$\cos \varphi$  – коэффициент мощности

Тогда крутящий момент:

$$M_{кр} = N \cdot \eta / \omega, \quad (2)$$

где  $M_{кр}$  – крутящий момент, Н·м;

$\eta$  – коэффициент полезного действия двигателя;

$\omega$  – угловая скорость, рад/с.

Угловая скорость при этом:

$$\omega = \pi \cdot n_{np} / 30, \quad (3)$$

где  $n_{np}$  – частота вращения двигателя при прокатке, об/мин.

Принимаем, в первом приближении:

$$M_{кр} = M_{np}, \quad (4)$$

где  $M_{np}$  – момент прокатки, Н·м.

Момент прокатки определяется из общеизвестной формулы:

$$M_{np} = 2 \cdot P \cdot a = 2 \cdot \psi \cdot l \cdot P, \quad (5)$$

где  $P$  – сила прокатки, Н;

$a$  – плечо силы прокатки относительно оси вращения вала, мм, для горячей прокатки  $a = (0,45 \dots 0,5) \cdot l$ ;

$\psi$  – эмпирический коэффициент, называемый коэффициентом плеча силы прокатки;

$l$  – длина контакта металла с валком, мм.

При этом длина контакта металла с валком определяется по формуле:

$$l \approx \sqrt{R \cdot \Delta h}, \quad (6)$$

где  $R$  – радиус валка, мм;

$\Delta h$  – абсолютное обжатие, мм.

Усилие прокатки определяется по формуле:

$$P = p_{cp} \cdot l \cdot b_{cp}, \quad (7)$$

где  $P$  – сила прокатки, Н;

$b_{cp}$  – средняя ширина очага, мм;

$p_{cp}$  – среднее давление по длине контакта, МПа.

Среднее давление можно найти по формуле:

$$p_{cp} = \frac{4 \cdot k}{\varepsilon \cdot \delta} \cdot \left[ \left( \frac{1}{1 - \varepsilon} \right)^{\frac{\delta - 1}{2}} - \left( 1 - \frac{\varepsilon}{2} \right) \right], \quad (8)$$

где  $k$  – коэффициент пластичности, МПа;

$\varepsilon$  – относительное обжатие металла;

$\delta$  – параметр прокатки.

Коэффициент пластичности при этом:

$$k = \frac{1,15}{2} \cdot \frac{(\sigma_{m0} + \sigma_{m1})}{2}, \quad (9)$$

где  $\sigma_{m0}$ ,  $\sigma_{m1}$  – предел текучести до и после прокатки, МПа.

Относительное обжатие металла определяется по формуле:

$$\varepsilon = (h_0 - h_1) / h_0, \quad (10)$$

где  $h_0, h_1$  – размер заготовки до и после прохода, мм.

Параметр прокатки:

$$\delta = \mu \cdot \frac{l}{h_{cp}} \cdot \frac{2 - \varepsilon}{\varepsilon}, \quad (11)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения при прокатке;

$h_{cp}$  – средняя толщина заготовки, мм.

Апробация методики проведена для следующих исходных данных. Нагрев заготовок осуществляется в пятизонной методической комбинированной нагревательной печи с шагающими водоохлаждающими балками. Прокатка заготовок производится на стан 390. Рабочая клеть №1 среднесортного стана 390 – дуо, бесстанинная, ненапряженная, жесткой конструкции, с валковыми опорами на подшипниках качения, горизонтальная (с горизонтальным расположением валков). Привод клетки – индивидуальный, горизонтально установленный регулируемый двигатель постоянного тока мощностью 400 кВт. Рабочая клеть – 600. Прокатные валки – чугунные цельной конструкции, с одним рабочим калибром; валковая арматура устанавливается непосредственно на раме клетки. Металл для прокатки – Ст5. Общие характеристики клетки представлены в таблице 1.

Исходя из графика изменения значения тока, при прокатке используется 40% мощности –  $N = 400 \times 0,4 = 160$  кВт. В качестве исходных данных по калибровке первой клетки: заготовка размером 151,9×151,9 мм; обжатие – 47,9 мм; уширение – 17,1 мм. Исходный размер, прокатываемого профиля  $h_0 = 151,9$  мм. Радиус вала  $R = 300$  мм. Ток при прокатке составляет  $I_{пр} = 45\% I_n$ ; частота вращения двигателя при прокатке  $n_{пр} = 699$  об/мин; передаточное отношение редуктора 1-й клетки  $u = 71$ .

Таблица 1. Общие характеристики клетки №1

Редуктор-шестеренная клеть	Общее передаточное отношение привода		71,00
	Коэффициент полезного действия		0,78
	Максимальный момент (момент прокатки)	кН·м	274
	Межосевое расстояние	мм	580
	Максимальное число оборотов привода	об/мин	653
Главный двигатель	Тип	постоянного тока с независимым возбуждением	
	Мощность	кВт	400
	Номинальное число оборотов	об/мин	50
	Максимальное число оборотов	об/мин	1000

График изменения значения тока двигателя представлен на рисунке 1.

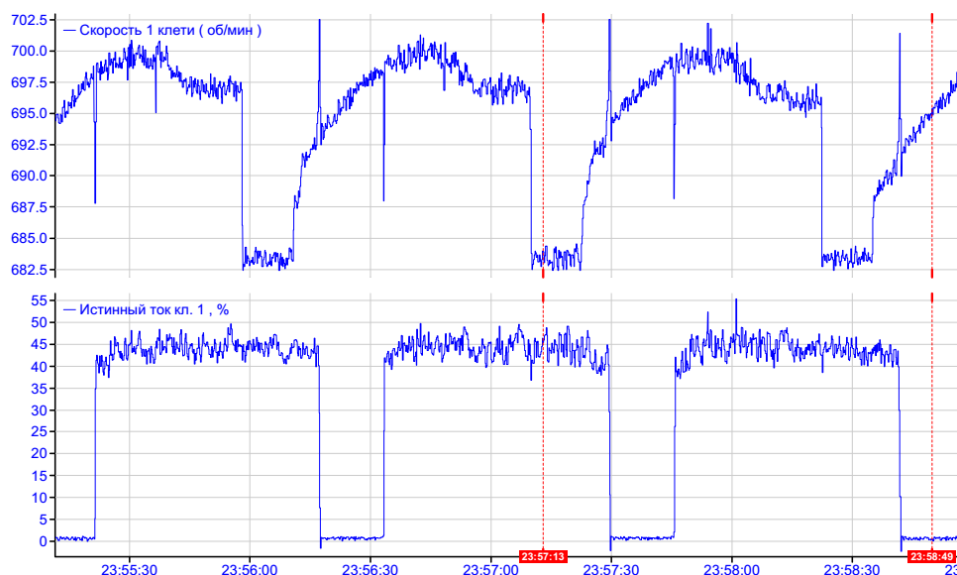


Рис. 1. График изменения значения тока двигателя при прокатке

Результаты расчетов представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты расчетов

Параметр	Значение
Крутящий момент $M_{кр}$ , Н·м	124800
Длина контакта металла с валком $l$ , мм	119,87
Усилие прокатки $P$ , Н	1041128
Среднее давление $p_{ср}$ , МПа	54,1
Относительное обжатие металла $\epsilon$	0,315
Параметр прокатки $\delta$	2,26
Коэффициент пластичности $k$ , МПа	22,6
Предел текучести $\sigma_T$ , МПа	39,3

Исходя из значения предела текучести определяется значение температуры нагрева металла по графику, представленному на рис. 2. Для заготовки марки Ст5 температура нагрева составляет 1100°C. Полученные результат косвенной идентификации значения среднемассовой температуры металла сопоставлены с расчетным значением, полученным при помощи верифицированной расчетной методики [9] для скоростного и температурного режимов печи, соответствующих моменту эксплуатации производственной линии, для которой были сняты значения тока главного двигателя.

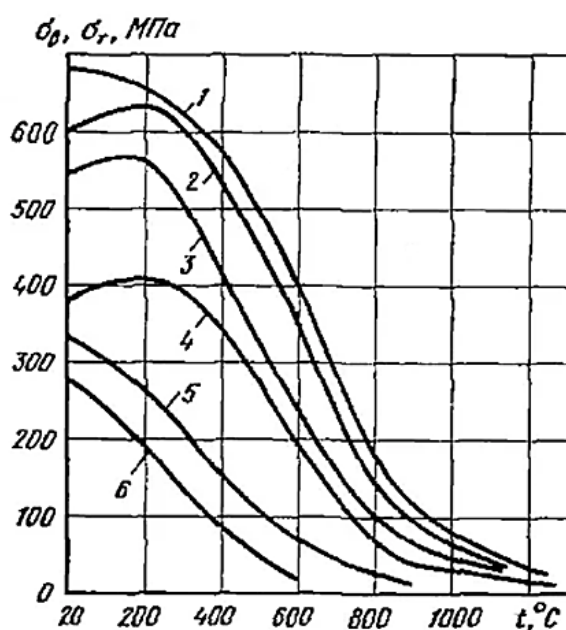


Рис. 2. Зависимость предела прочности (текучности) различных металлов и сплавов от температуры: 1 – X12H9T; 2 – сталь 50; 3 – Ст5; 4 – Ст3; 5 – латунь; 6 – дюралюминий

Согласно данной методики расчет нагрева металла в методической комбинированной нагревательной печи с шагающими водоохлождающими балками стана 390 Макеевского металлургического завода выполнялся для заготовок размером 151,9×151,9 мм, производительность – 127 т/ч. Температурный профиль печи: 1015 °C – в подогревательных зонах, 1210 °C и 1250 °C – в нагревательных зонах, а также 1200 °C и 1230 °C в томильных зонах.

Полученное расчетное значение среднемассовой температуры металла на выдаче из печи составило 1105°C. Расхождение между расчетным значением температуры и температуры, полученной по результатам оперативных измерений не превышает 2%.

**Выводы.** Предложен способ идентификации среднемассовой температуры сортовых заготовок, полученного при их нагреве в печи с шагающими балками на основании анализа текущих энергосиловых параметров первой клетки прокатного стана.

Результаты расчетов показали, что для заданных условий возможно определение температуры нагрева металла. Для марки Ст5 температура составляет 1100°C. Подтверждение адекватности предложенной методики осуществлялось с помощью метода термометрирования. Расхождение между расчетным значением температуры и температуры, полученной по результатам оперативных измерений не превышает 2%.

Реализация данной разработки в режиме реального времени позволяет контролировать рациональность установленных параметров температурного режима печи.



СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Обработка металлов давлением / Под ред. Ю.Ф. Шевакина. – М: Интермет Инжиниринг, 2005. — 496 с.
2. Повышение точности определения теплового состояния металла в методической зоне проходной печи при использовании инженерных методов / А. Б. Бирюков, А. Н. Лебедев, Ю. О. Турулина, С. А. Онищенко // Вестник Академии гражданской защиты. – 2017. – № 1(9). – С. 5-11. – EDN YTLEWG.
3. Бирюков, А. Б. Методика определения температурного профиля методической печи, работающей в условиях пониженной производительности / А. Б. Бирюков, А. Н. Лебедев, Ю. О. Турулина // Сталь. – 2017. – № 10. – С. 74-77. – EDN ZKBEAJ.
4. Ткаченко, В. Н. Математическое моделирование, идентификация и управление технологическими процессами тепловой обработки материалов / В. Н. Ткаченко. – Киев: Наукова думка, 2008. – 244 с.
5. Гусовский, В. Л. Методики расчета нагревательных и термических печей: Учебно-справочное издание / В. Л. Гусовский, А. Е. Лифшиц. – М.: Теплотехник, 2004. – 400 с.
6. Андреев, С. М. Экспериментальное исследование эффективности энергосберегающих оптимальных режимов нагрева металла / С. М. Андреев, Б. Н. Парсункин // Автоматизированные технологии и производства. – 2014. – №. 6. – С. 134-143.
7. Денисов М. А. Разработка и применение методов теплофизического исследования резервов ресурсосбережения в процессах нагрева металла: дис. ... докт. техн. наук : 05.16.02. – ЕКБ, 2005. – 369 с.
8. Бирюков, А. Б. Совершенствование расчетного метода определения рациональных режимных параметров проходной печи с механизированным подом, работающей в условиях переменной производительности / А. Б. Бирюков, Ю. О. Турулина // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2022. – № 3. – С. 52-56. – EDN ROTUEX.
9. Бирюков, А. Б. Инженерная методика определения температурного состояния металла при его нагреве / А. Б. Бирюков, Ю. О. Турулина // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2024. – № 2. – С. 24-31. – DOI 10.17588/2072-2672.2024.2.024-031. – EDN WSOUGB.

*Поступила в редакцию 19.07.2024 г., рекомендована к печати 06.09.2024 г.*

**INDIRECT DETERMINATION OF METAL TEMPERATURE BASED ON ANALYSIS OF ENERGY-POWER PARAMETERS OF A ROLLING MILL ROUGH STAND**

*Turulina I.U.O., Biriukov A.B., Sidorov V.A.*

A method is proposed for determining the temperature of the metal based on an analysis of the energy-power parameters of the roughing stand of a rolling mill. The method allows you to determine the temperature of the workpiece in the cage depending on the motor current. The implementation of this development in real time allows you to control the rationality of the established parameters of the furnace temperature regime.

**Keywords:** rolling mill, mass-average metal temperature, indirect method, tensile strength, identification.

**Турулина Юлия Олеговна**

аспирант ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,  
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: turulinay@mail.ru

**Turulina Iuliia Olegovna**

Postgraduate student of Donetsk National Technical University,  
Russian Federation, DPR, Donetsk.

**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 ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет»,  
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: sidorov\_va58@mail.ru

**Sidorov Vladimir Anatolevich**

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at Department of Mechanical Equipment of Ferrous Metallurgy Plants of Donetsk National Technical University,  
Russian Federation, DPR, Donetsk.

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕЖИМОВ РАЗГОНА АВТОМОБИЛЯ С ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКОЙ

© 2024 Горожанкин С.А., Савенков Н.В., Степакин В.Р.

---

Исследованы режимы движения автомобиля категории  $N_1$  с гибридной силовой установкой. Рассматриваются возможности повышения его топливной экономичности для режимов движения в стандартизованном городском ездовом цикле. Это достигается путем использования на участках разгона тягового электродвигателя, а на участках цикла с постоянной скоростью – движение с использованием ДВС с параллельной зарядкой аккумуляторов. Благодаря работе ДВС с более высокой экономичностью на таких режимах достигается минимальный путевой расход топлива. В качестве критерия оценки эффективности предлагаемых режимов движения рассматривается суммарные расходы топлива в цикле. Результаты получены на примере модельного ряда автомобилей семейства «Соболь» с гибридным силовым агрегатом.

**Ключевые слова:** автомобиль, гибридная силовая установка, ДВС, электродвигатель, ездовой цикл, удельные расход топлива, путевой расход.

---

**Введение.** Для работы в составе гибридных силовых установок наиболее приемлемы обратимые электрические машины [1]. Принцип обратимости предполагает их способность работать как в режиме двигателей, так и в генераторном.

Несмотря на то, что многие электрические машины обратимы, их максимальный КПД может быть обеспечен, как правило, при работе в соответствии с приоритетным назначением – двигатель или генератор. Поэтому КПД электродвигателя, используемого в режиме работы генератора, несколько меньше, чем КПД генератора прямого функционального назначения, т.е. обратимость является неполной.

В соответствии с этим, если в гибридной силовой установке электромашина, соединяется напрямую (или через разобщительную муфту) с двигателем внутреннего сгорания, то она работает либо в режиме генератора, либо тягового электродвигателя. Параметры электромашины следует подбирать исходя из требования преобразования механической энергии в электрическую с максимальным КПД. Такой генератор может работать в режиме двигателя при пуске ДВС (в случае использования его в качестве стартера), либо при необходимости значительного увеличения тяговой мощности силовой установки (при обгонах, движении на подъемах, по труднопроходимой местности).

**Постановка задачи.** Целью данной работы является исследование и оптимизация режимов работы двигателя внутреннего сгорания и обратимой электромашины в составе гибридной силовой установки автомобилей категорий  $M_1$  и  $N_1$ , обеспечивающих минимальный путевой расход топлива в городском ездовом цикле.

При движении автомобиля в благоприятных дорожных условиях и работе ДВС наиболее целесообразным режимом работы электрической машины становится генераторный, позволяющий обеспечить требуемый запас электрической энергии. В этом случае становится необходимым обеспечить максимальный КПД цепочки «ДВС – генератор – преобразователь тока – аккумуляторная батарея». Указанный КПД определяет, по существу, удельный расход топлива, затраченного для получения 1 кВт\*ч электрической энергии, которая «запасается» в аккумуляторе и в дальнейшем может быть использована для работы тяговых электродвигателей.

Его величину сложно определить с высокой достоверностью, поскольку при сравнительно высоких значениях КПД генератора (0.85...0.92), а также преобразователей (~0.95...0.97) решающее значение приобретает КПД процесса зарядки аккумулятора и последующей отдачи электроэнергии. В этом плане КПД аккумуляторных батарей для многих их типов является весьма неопределенным, т.к. зависит не только от типа, но и состояния, степени заряженности, срока службы [2].

Установка обратимой электромашин с номинальной частотой вращения 5000 мин<sup>-1</sup> позволяет обеспечить ее КПД не менее 0.85 в достаточных диапазонах нагрузок и частот вращения. Диапазон рабочих частот вращения для такого генератора (от ~800 мин<sup>-1</sup> до 5000 мин<sup>-1</sup>) весьма благоприятен, т.к. КПД в этом интервале близок к максимальному (см. рис.1), особенно при малых относительных нагрузках.

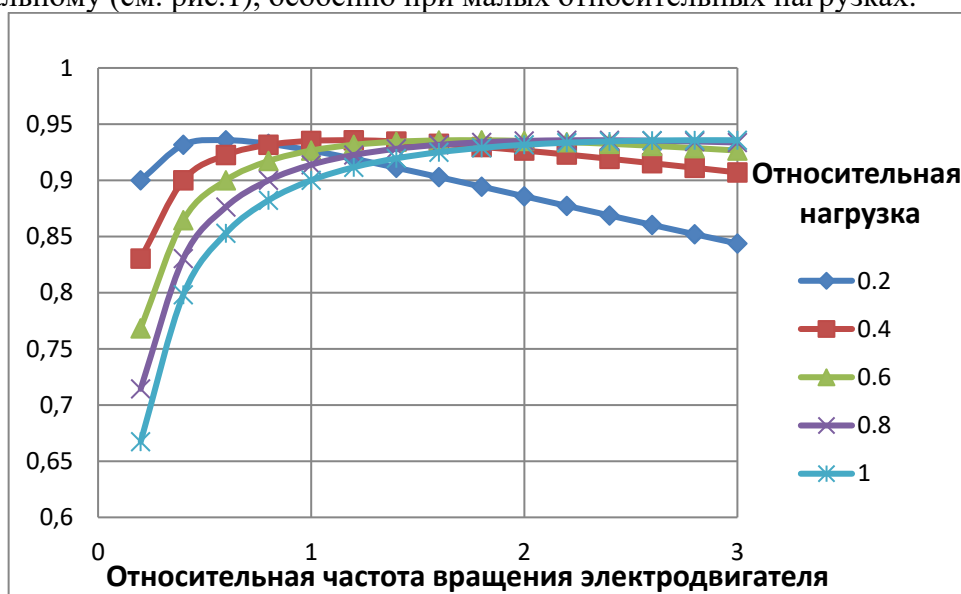


Рис. 1. КПД синхронного электрогенератора в зависимости от его частоты вращения и нагрузки [1]

Номинальная мощность этой электромашин должна быть не менее 50-60% номинальной мощности ДВС в связи со следующими обстоятельствами:

- становится возможным, при благоприятных условиях, особенно при движении в городе, обеспечивать разгон автомобиля только при помощи электродвигателей, причем преимущественно установленных на ведущих осях;

- современные электронно-силовые преобразователи в состоянии осуществить преобразование постоянного тока в переменный необходимой частоты при требуемых нагрузках и частотах вращения этих электродвигателей;

- ДВС и связанная с ним трансмиссия автомобиля в процессе такого разгона используется лишь при необходимости достижения более высокой мощности силовой установки, что для многих режимов движения нецелесообразно вследствие возрастания при этом удельного расхода топлива;

- становится возможным при движении с постоянной скоростью переводить ДВС на установившийся режим работы с минимальным удельным расходом топлива, для которого обычно характерна работа со средними частотами вращения и коэффициентами использования мощности в пределах 0.6...0.8.

Именно подобные режимы, как указывается в нормативно-технической документации, устанавливаются для многих ДВС японских производителей, причем в описаниях работы таких двигателей указано «работа по циклу Аткинсона», «работа по циклу Миллера» и др. особенности.

Вследствие этого возникает вопрос о возможности отказа от сложной и дорогостоящей планетарной передачи, связывающей электродвигатели и ДВС, а также вариатора, КПД которого, к сожалению, на большинстве режимов не превышает 0.85.

Ключевыми достоинствами предлагаемых в статье схем является их простота, в т.ч. в плане реализации переоборудования серийного автомобиля.

Для электромашины, установленной на передней ведущей оси автомобиля, и соединенной с полуосями традиционной главной передачей, приоритетным режимом работы является режим двигателя (в некоторых изданиях его именуют «двигательным»). В этом случае становится возможным обеспечить максимальный КПД цепочки «Аккумулятор – электронный преобразователь напряжения - тяговый электродвигатель - трансмиссия». При этом также исключаются дополнительные потери в карданной передаче, коробке передач.

Такой электродвигатель может переводиться в генераторный режим как при движении, в том числе и при замедлении с использованием кинетической энергии автомобиля. При переводе такого электродвигателя с номинальной частотой вращения  $\sim 5000 \text{ мин}^{-1}$  в генераторный режим КПД несколько снижается, особенно при малых частотах вращения. Следует отметить, что при замедлениях автомобиля до скорости ниже 10 км/ч доля его остаточной кинетической энергии невелика, поэтому потери вследствие неполного ее использования для зарядки аккумуляторов незначительны. Помимо этого необходимо учесть, что при замедлениях ниже скорости 10 км/ч стандарт движения предусматривает использование рабочей тормозной системы.

Рассматриваемые принципиальные схемы гибридных силовых установок, которыми могут оснащаться автомобили категорий  $M_1$  и  $N_1$ , приведены на рис. 2.

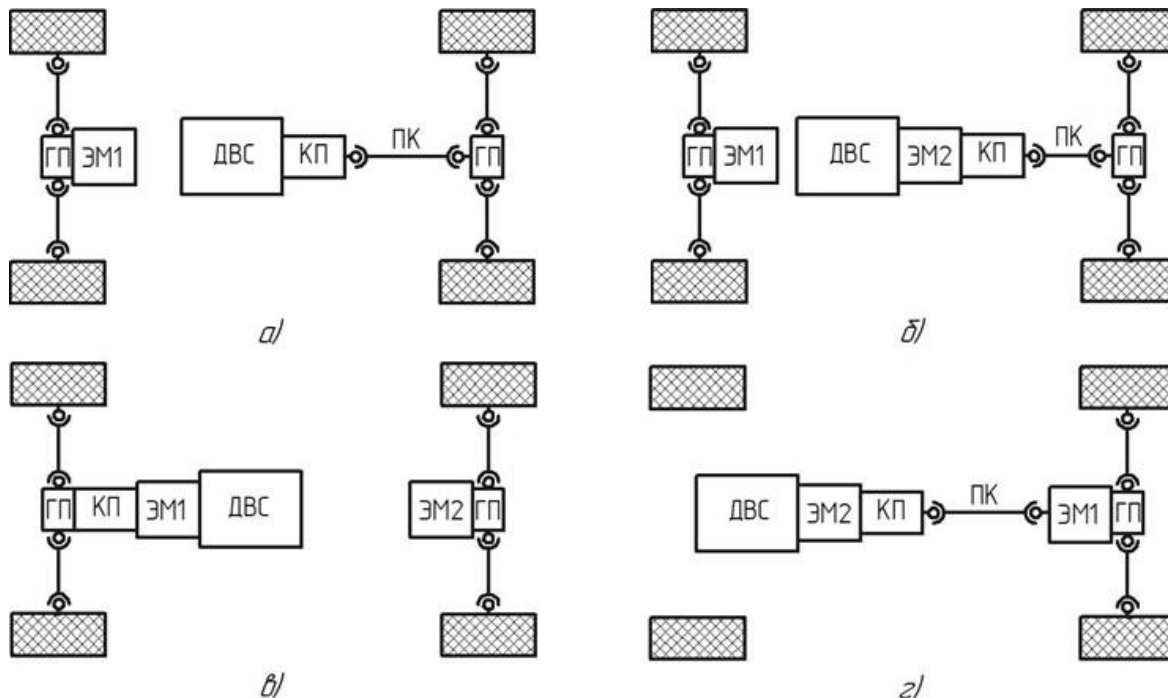


Рис. 2. Схемы гибридных силовых установок, которыми оснащаются автомобили категорий  $M_1$  и  $N_1$ : ДВС – двигатель внутреннего сгорания; КП – коробка передач; ЭМ1, ЭМ2 – обратимые электромашины; ГП – главные передачи

Для всех из них предусмотрена передача мощности на колеса автомобиля как от ДВС либо электродвигателя, так и совместно от обоих двигателей, либо даже от ДВС и двух электродвигателей, как это показано для схем «б», «в» и «г». Каждая из приведенных схем предусматривает зарядку тяговой аккумуляторной батареи как при движении автомобиля, так и при его замедлении, в том числе, при отключенном ДВС.

Все представленные схемы в общем случае являются полноприводными, за исключением последней (схема «г»). Простейшей из них является схема «а», которая может быть реализована сравнительно несложным путем установки обратимой электромашины с дифференциалом на переднем мосту автомобиля классической компоновки.

В данной статье в качестве примера рассматривается автомобиль ГАЗ «Соболь» [3], компоновка гибридной силовой установки которого выполнена по схеме «а». Номинальная мощность его бензинового двигателя составляет 72 кВт при частоте вращения 4500 мин<sup>-1</sup>, номинальная мощность единой электромашины – 34 кВт в режиме двигателя при частоте вращения 5000 мин<sup>-1</sup>. Очевидно, что при движении автомобиля только за счет электродвигателя, этот автомобиль становится переднеприводным. Определенным недостатком схемы становится невозможность зарядки тяговой аккумуляторной батареи от ДВС при неподвижном автомобиле, однако такой способ зарядки батареи является вынужденным и применяется только в случае ее значительного разряда.

Схема «б» свободна от вышеперечисленных недостатков, в сравнении с предыдущей, поскольку дополнена электромашинной ЭМ2, установленной в трансмиссии между ДВС и разобщительным устройством (механизмом сцепления или каким либо другим). В гибридных силовых установках также известно применение муфт свободного хода, это используется для того, чтобы ДВС не работал в режиме принудительного холостого хода. Такое решение позволяет использовать ее в качестве дополнительного двигателя, а также в генераторном режиме. Конструктивно она может быть реализована при модернизации автомобилей вышеупомянутых категорий (M<sub>1</sub> и N<sub>1</sub>).

Схема «в» хорошо известна по опыту создания и эксплуатации легковых автомобилей с гибридными силовыми установками производства японских фирм (Toyota, Lexus и др.). Модели перечисленных марок оснащаются гибридными силовыми агрегатами, имеющими планетарные механизмы. На заднем мосту автомобиля устанавливается вторая электромашинка, позволяющая обеспечить (при необходимости) не только дополнительное тяговое усилие, но и, в определенной мере, повышающая проходимость, управляемость и устойчивость автомобиля. Однако в предлагаемом варианте «а» трансмиссия является сравнительно простой и дешевой, поскольку в ней не используются дорогие планетарные передачи, а также ступень с вариатором, обладающим сравнительно низким КПД. Помимо этого ее практически несложно реализовать для существующих моделей автомобилей вышеуказанных категорий.

И, наконец, схема «г» представляет, по существу, автомобиль классической компоновки, в трансмиссию которого параллельно вмонтированы две электромашинки. Для снижения нагрузок в трансмиссии мощность ЭМ1 целесообразно принимать соизмеримой с мощностью ЭМ2, причем мощность последней, как будет показано ниже, должна составлять 50-60% номинальной мощности ДВС. В этом случае обеспечивается высокая эффективность регенерации кинетической энергии автомобиля при движении в городском цикле.

Несомненным преимуществом схем «б» и «в» является возможность рекуперации кинетической энергии автомобиля с высоким КПД, определяемым, не считая генератора и преобразователей, лишь механическими потерями в трансмиссии и подшипниках полуосей.

Определенным недостатком всех предлагаемых схем является невысокая мощность электродвигателя ЭМ1 при трогании автомобиля с места. Однако для синхронных машин при этом крутящий момент максимален и практически равен номинальному. В этом случае выбор достаточной номинальной мощности ЭМ1 позволяет обеспечить трогание с места и разгон при постоянном крутящем моменте. С другой стороны, при значительной мощности этой электромашины обеспечивается эффективный заряд тяговой аккумуляторной батареи при замедлении автомобиля до практически нулевой скорости с использованием режима регенерации. И, конечно, любая из приведенных схем предусматривает подключение к движителю ДВС традиционным путем с использованием коробки передач.

Исходя из представленных положений авторами ранее рассмотрена возможность рекуперации кинетической энергии автомобиля категорий М<sub>1</sub> и N<sub>1</sub> при его движении в городском цикле [4]. При этом предполагалось движение автомобиля при одновременной работе ДВС и тягового электродвигателя на участках разгона и равномерного движения, а также электрического генератора при замедлениях автомобиля.

В данной работе рассматривается движение автомобиля в городском цикле с использованием на участках разгона только при работе обратимой электромашины в режиме двигателя. Схема движения в ездовом цикле и номера его расчетных участков приведены на рис.3.

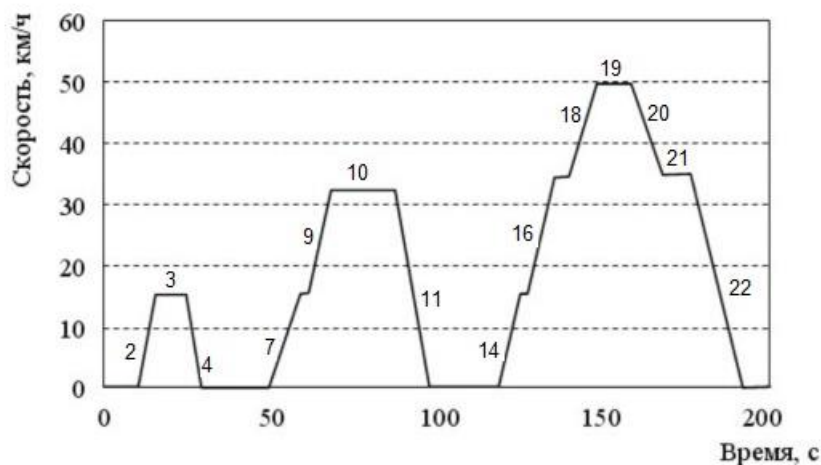


Рис. 3. Условная нумерация участков городского ездового цикла

Проведены в соответствии с теорией двигателей внутреннего сгорания [5,6] и зависимостями, представленными в [7,8], расчеты режимов работы силовой установки автомобиля в городском цикле, обеспечивающие работу ДВС только на участках установившегося движения с постоянной скоростью. При этом на участках разгона используется исключительно электродвигатель, а на участках с постоянной скоростью за счет избыточной энергии ДВС осуществляется работа обратимой машины в режиме генератора с параллельной зарядкой аккумуляторной батареи. Помимо этого, предусматривается ее зарядка на участках замедления за счет использования кинетической энергии автомобиля.

В данном исследовании предполагается, что на всех участках разгона европейского городского цикла (№№ 2, 7, 9, 14, 16 и 18) для ускорения автомобиля используется только электродвигатель. ДВС при этом может работать либо на холостом ходу, либо вообще быть отключен. Расчеты показали, что для обеспечения разгона автомобиля до скорости 50 км/ч, предусмотренной стандартом, требуемая номинальная мощность электродвигателя в тяговом режиме должна составлять не менее 34 кВт. При разгонах автомобиля до скорости 50 км/ч коэффициент использования его мощности достигает значения 0.963.

Движение автомобиля на участках с постоянной скоростью (участки 3, 20, 19 и 21 на рис.3) осуществляется за счет ДВС, причем при этом одновременно производится зарядка аккумуляторной батареи. Поскольку тяговая мощность, необходимая для обеспечения движения, при этом сравнительно невелика, значительная доля мощности ДВС используется для зарядки аккумулятора. Благодаря такому режиму увеличивается коэффициент использования мощности ДВС, что приводит к снижению удельного расхода топлива этим двигателем, хотя абсолютный расход топлива на участке, естественно, возрастает.

На всех участках замедления автомобиля до скорости 10 км/ч обратимая электромашина работает в режиме генератора, возвращая часть рекуперированной кинетической энергии автомобиля в аккумулятор.

При работе в режиме генератора (номинальная мощность 30.6 кВт) в городском цикле в соответствии с установленными стандартом замедлениями автомобиля (участки 4, 11, 20 и 22) коэффициент использования его мощности не превышает 0.57. Такой резерв коэффициента использования этой мощности позволяет существенно повысить эффективность использования кинетической энергии автомобиля при значительных отрицательных ускорениях (замедлениях), например, в загородном цикле. Для обеспечения полной рекуперации электрической энергии, затраченной на режимах разгона от тягового аккумулятора, коэффициенты использования мощности генератора на участках замедления оптимизировались таким образом, чтобы обеспечивалась указанная рекуперация.

При проведении исследований руководствовались следующими положениями. Мощность электродвигателя (совмещенной электромашины) должна быть принята с таким расчетом, чтобы в процессе движения:

- обеспечивался разгон автомобиля по участкам в соответствии с требованиями ездового цикла;
- электродвигатель на любых режимах движения мог быть использован для увеличения общей тяговой мощности силовой установки;
- в режиме генератора обеспечивалось максимально возможное использование кинетической энергии автомобиля;
- осуществлялся попутный заряд аккумуляторной батареи при ее неполной зарядке на участках установившегося движения.

Результаты исследований представлены в таблице 1. Расчеты показали, что в результате прохождения ездового цикла (см. рис.3) серийным автомобилем «Соболь», оснащенным только бензиновым двигателем расход топлива за цикл составляет 225.3 г. Все разгоны осуществляются на первых трех передачах в соответствии с требованиями стандарта [4]. При движении по участкам установившегося движения, как это показано в колонке 0, значения коэффициентов использования мощности ДВС невелики и лежат в пределах (0.05...0.21). Этот вариант режимов движения принят в качестве исходного (базового) для сравнения с последующими.

Таблица 1. Параметры работы гибридной силовой установки автомобиля при движении в городском цикле

Режимы движения в городском цикле	Номера участков цикла	0 Движение в цикле осуществляется только за счет ДВС (исходный базовый вариант)	Все разгоны осуществляются только от электродвигателя		
			I ДВС при разгонах и снижении скорости работает в режиме холостого хода. На участках с постоянной скоростью движение осуществляется за счет ДВС с одновременной зарядкой аккумулятора	II На участке 3 движение за счет электродвигателя. На участках 10, 19 и 21 движение осуществляется за счет ДВС с одновременной зарядкой аккумулятора	III На участках 3 и 10 движение за счет электродвигателя. На участках 19 и 21 движение осуществляется за счет ДВС с одновременной зарядкой аккумулятора
Коэффиц. использования мощности ДВС и его удельный расход топлива, г/(кВт*ч)	3	0.045	0.18 (987.4)	-	-
	10	0.10	0.32 (646.9)	0.35 (609.1)	-
	19	0.21	0.46 (336.9)	0.49 (317.9)	0.87 (301.6)
	21	0.17	0.32 (645.4)	0.33 (627.3)	0.68 (379.1)
Суммарный расход топлива за цикл, г		225.3	222.9	216.6	175.3
Аккумуляированная электроэнергия, (кДж) на 1 г топлива	3	-	3.646	-	-
	10	-	5.565	5.910	-
	19	-	10.686	11.323	11.937
	21	-	5.578	5.739	9.497
Суммарный расход топлива за цикл, г при включении ДВС на скорости выше 15 км/ч		-	-	174.3	133.0
Суммарный расход топлива за цикл, г при включении ДВС на скорости выше 30 км/ч		-	-	158.0	117.7

Исследовано несколько вариантов использования гибридной силовой установки при движении автомобиля, а именно - режимов работы ее ДВС и обратной электромашин.

В колонке I приведены величины коэффициентов использования мощности ДВС при движении на участках с постоянной скоростью и параллельной зарядкой аккумулятора, а также значения удельных расходов топлива на таких режимах. В этом случае ДВС работает в режиме холостого хода при разгонах и замедлениях автомобиля. Результаты показывают, что в целом экономия топлива крайне мала (около 1%).



Исследования показали, что заряд аккумуляторной батареи нецелесообразно осуществлять при движении автомобиля на участке 3, поскольку при этом доля рекуперированной энергии невелика, а удельный расход топлива ДВС при движении на первой передаче остается значительным, как это видно из данных, приведенных в колонке I таблицы.

В колонке II представлены результаты, полученные при движении на участке 3 только от электродвигателя. ДВС работает на холостом ходу на режимах разгона и замедления. В этом варианте несколько возрастают коэффициенты использования его мощности на участках 10, 19 и 22 с одновременным снижением удельного расхода топлива. В целом суммарный расход топлива за цикл уменьшается до 216.6 г (на 3.9%), т.е. незначительно. поэтому в дальнейших исследованиях предусматривалось остановка ДВС при скоростях движения менее 15 км/ч.

Существенного уменьшения расхода топлива удастся добиться путем отказа от работы ДВС на холостом ходу при скоростях движения 15 км/ч и ниже на режимах разгона, замедления и остановки, как это показано в предпоследней строке таблицы 1. Такая практика хорошо известна при эксплуатации легковых автомобилей с гибридными силовыми установками. В этом случае уменьшается время бесполезной работы двигателя внутреннего сгорания на холостом ходу при движении с малыми скоростями и замедлениях. В целом это обеспечивает уменьшение расхода топлива за цикл до 174.3 г (на 22.2%).

Рассмотрен также вариант запуска и работы ДВС лишь при движении автомобиля со скоростями более 30 км/ч. В этом случае все разгоны автомобиля, как и ранее, обеспечиваются с помощью только электродвигателя. При этом может быть получена еще большая экономия топлива, поскольку расход топлива за цикл снижается до 158 г (уменьшение на 24.5%). Результаты этих исследований приведены в последней строке таблицы 1 (колонка II).

В ходе исследований проведены вычисления вариантов с возможным использованием движения только от электродвигателя при скорости автомобиля 32 км/ч на участке 10. Несмотря на значительную продолжительность движения на этом участке (24 с) затраты электрической энергии от аккумулятора удастся компенсировать за счет работы генератора с более высокой мощностью на последующих участках установившегося движения 19 и 21. Это приводит к переходу ДВС на высокие значения коэффициента использования мощности - в пределах 0.6...0.9. Для таких режимов у большинства бензиновых двигателей характерен удельный расход топлива, близкий к минимальному. Полученные величины коэффициентов использования мощности ДВС на этих режимах работы двигателя и суммарный расход топлива за цикл (133 и 117.7 г) представлены в колонке III таблицы 1. Характерно, что на участках 19 и 21 практически полностью используется электрическая мощность генератора, коэффициент его нагрузки составляет 0.96.

Таким образом, результаты, приводимые в этой таблице, свидетельствуют, что выбор принятых режимов движения по участкам с постоянной скоростью дают возможность существенно сократить как удельный, так и путевой расходы топлива за счет работы двигателя внутреннего сгорания с более высокими коэффициентами использования мощности.

Проведены расчеты для варианта запуска ДВС при достижении автомобилем скорости 50 км/ч и движения от этого двигателя только на участке 19 с параллельной зарядкой аккумулятора (в таблице 1 не приведены). Они показали, что в этом случае мощность двигателя должна быть существенно увеличена - до 105 кВт, электромашины – до 90 кВт.

**Выводы.** 1. Результаты исследований позволили установить рациональные режимы работы силовой установки для грузового автомобиля ГАЗ «Соболь» при его движении в городском цикле.

2. Использование только электрического двигателя на всех режимах движения автомобиля со скоростями до 15 км/ч в городском ездовом цикле, а также осуществлении всех его разгонов до скорости 50 км/ч позволяет существенно снизить расход топлива (на 24.5%).

3. Установка режимов движения только от электрического двигателя при скоростях до 30 км/ч дает еще большую экономию топлива за счет значительного возрастания коэффициента использования мощности ДВС при движении по участкам с постоянной скоростью и одновременной зарядкой аккумулятора. Расход топлива при таком графике прохождения цикла снижается до 30%.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Фираго, Б. И. Энергетические показатели синхронного частотно-регулируемого электропривода / Б. И. Фираго, С. В. Александровский // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. Объединений СНГ. – 2018. – Т.61, №4. – С. 287-298.
2. Таганова, А. А. Герметические химические источники тока для портативной аппаратуры. Справочник / А. А. Таганова, И. А. Пак. – СПб.: ХИМИЗДАТ, 2003. – 208 с.
3. ГАЗ-2752 «Соболь»: технические характеристики [Электронный ресурс] / Грузовик-РЕВЮ. Интернет-журнал о грузовых автомобилях [Сайт]. – URL: <https://trucksreview.ru/gaz/gaz-2752-sobol-tehnicheskie-harakteristiki.html?ysclid=lzy0sw2md9687340905> (дата обращения 17.08.2024).
4. ГОСТ Р 41.101-99 (Правила ЕЭК ООН №101). Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения легковых автомобилей, оборудованных двигателем внутреннего сгорания, в отношении измерения объема выбросов диоксида углерода и расхода топлива, а также транспортных средств категории М1 и и N1, оборудованных электроприводом, в отношении измерения расхода электроэнергии и запаса хода : государственный стандарт : издание официальное: принят и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 26 мая 1999 г. № 184 : введен впервые : дата вступления в силу 01.01.1997. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 37 с.
5. Двигатели внутреннего сгорания. В 3 кн. Кн. 1. Теория рабочих процессов: учебник для вузов / В. Н. Луканин, К. А. Морозов, А. С. Хачиян [и др.]; Под ред. В.Н. Луканина. – 2-е изд. перераб. и доп.– М.: Высш. шк., 2005. – 479 с.
6. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей / Д. Н. Вырубов, Н. А. Ивашенко, В. И. Ивин [и др.]. – М.: Машиностроение, 1983. – 372 с.
7. Горожанкин, С. А. Исследование гибридной силовой установки для легких коммерческих автомобилей / С. А. Горожанкин, Н. В. Савенков // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 3. – С. 52-61. – EDN CUVXAK.
8. Горожанкин, С. А. Расчет тяговоскоростных и топливноэкономических свойств автомобилей в современных эксплуатационных условиях: учебное пособие по дисциплине «Теория эксплуатационных свойств» для студентов направления подготовки 23.03.03 «Эксплуатация транспортнотехнологических машин и комплексов» / С. А. Горожанкин, А. Д. Бумага, Н. В. Савенков. – Донецк: РА ДОН, 2019. – 244 с.

*Поступила в редакцию 19.08.2024 г., рекомендована к печати 10.09.2024 г.*

## ENERGY EFFICIENCY OF HYBRID VEHICLE ACCELERATION MODES

*Gorozhankin S.A., Savenkov N.V., Stepakin V.R.*

The driving modes of the  $N_1$  category car with a hybrid power plant are investigated. The possibilities of increasing its fuel efficiency for driving modes in a standardized urban driving cycle are considered. This is achieved by using a traction electric motor in the acceleration sections, and driving using an internal combustion engine with parallel charging of batteries in the cycle sections with a constant speed. Due to the operation of the internal combustion engine with higher efficiency in such modes, minimum ground fuel consumption is achieved. As a criterion for assessing the efficiency of the proposed driving modes, the total fuel consumption in the cycle is considered. The results were obtained on the example of the model range of cars of the Sobol family with a hybrid power unit.

**Keywords:** car, hybrid power plant, internal combustion engine, electric motor, drive cycle, specific fuel consumption, travel consumption.

### **Горожанкин Сергей Андреевич**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,

Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.

E-mail: s.a.gorozhankin@donnasa.ru

### **Gorozhankin Sergei Andreevich**

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor of the Department of Automotive Transport, Service and Operation of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Russian Federation, DPR, Donetsk.

### **Савенков Никита Владимирович**

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,

Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.

E-mail: n.v.savenkov@donnasa.ru

### **Savenkov Nikita Vladimirovich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Automotive Transport, Service and Operation of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Russian Federation, DPR, Donetsk.

### **Степакин Вячеслав Романович**

аспирант кафедры автомобильного транспорта, сервиса и эксплуатации ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,

Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.

E-mail: v.r.stepakin@donnasa.ru

### **Stepakin Viacheslav Romanovich**

Postgraduate student at Department of Automotive Transport, Service and Operation of the Federal State Budget Educational Institution of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Russian Federation, DPR, Donetsk.

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РЕАЛИЗАЦИИ ОПЕРАТИВНОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ УРОВНЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА

© 2024 Бирюков А.Б., Гнитиёв П.А.

Проанализированы аппаратные и алгоритмические особенности оперативной идентификации коэффициентов полезного действия котельного агрегата по методам прямого и обратного балансов. В работе проработаны алгоритмические и приборные особенности реализации оперативного диагностирования котельного агрегата. Рассмотрены вопросы реализации диагностирования брутто котельного агрегата по прямому и обратному методам. Также выдвинута идея о целесообразности реализации в реальном времени диагностирования по прямому и обратному методам. Отмечено, что большую часть параметров работы котельного агрегата можно зафиксировать с помощью современной автоматики и КИП котлового агрегата, а также теплосчетчиков и корректоров объема газа.

**Ключевые слова:** котельный агрегат, к.п.д.-нетто, к.п.д.-брутто, энергоэффективность, полезно используемая теплота.

**Введение.** При рассмотрении вопроса эффективности работы котельного агрегата (КА) коэффициент полезного действия (к.п.д.) является одним из основных критериев, определяющих энергоэффективность теплогенерирующего оборудования. Разработка способов совершенствования работы КА путем изменения коэффициента полезного действия позволит улучшить энергетическую эффективность использования топлива.

**Анализ публикаций по теме исследования.** Традиционно коэффициентом полезного действия отопительного котла называют отношение полезной теплоты, израсходованной на выработку пара (или горячей воды), к располагаемой теплоте отопительного котла. На практике вся полезная теплота, выработанная КА, не может быть передана потребителю из-за того, что часть теплоты вынужденно расходуется на собственные нужды [1]. В связи с этим различают два вида к.п.д. отопительного котла:

- по выработанной теплоте (к.п.д.-брутто);
- по отпущенной теплоте (к.п.д.-нетто).

Количество теплоты, затрачиваемое на собственные нужды, является разницей между выработанной и отпущенной потребителю теплотой. На собственные нужды расходуется не только энергия в виде теплоты, но и в виде электричества (например, на привод дымососа, вентилятора, питательных насосов, механизмов топливоподачи), т.е. расход на собственные нужды включает в себя расход всех видов энергии, затраченных на производство пара или горячей воды [2].

В конечном счете к.п.д.-брутто отопительного котла характеризует степень его технического совершенства, а к.п.д.-нетто – коммерческую экономичность. Для КА к.п.д.-брутто может быть определен, % [3]:

---

*Работа выполнена в рамках научной темы «Повышение энергоэффективности выработки, транспортировки и потребления тепловой энергии» (шифр научной темы, присвоенной учредителем FRRF-2023-0003, регистрационный номер 1023031000013-2-2.2.3).*

- по уравнению прямого баланса:

$$\eta_{\text{брутто}} = 100 \cdot \frac{Q_{\text{пол}}}{Q_{\text{рр}}},$$

где  $Q_{\text{пол}}$  - количество полезно используемой теплоты, МДж/кг;  $Q_{\text{рр}}$  - располагаемая теплота, МДж/кг. Или [3]:

$$\eta = \frac{G_{\text{в}} \cdot c_{\text{в}} \cdot \Delta t_{\text{в}}}{V_{\text{т}} \cdot Q_{\text{н}}^{\text{р}}}, \quad (1)$$

где  $G_{\text{в}}$  – расход воды через КА, м<sup>3</sup>/с;  $c_{\text{в}}$  – теплоемкость воды, кДж/(кг·К);  $\Delta t_{\text{в}}$  – разница температур на входе и выходе из КА, °С;  $V_{\text{т}}$  – расход топлива на горелки, м<sup>3</sup>/с;  $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$  – низшая теплота сгорания топлива, кДж/м<sup>3</sup>.

- по уравнению обратного баланса:

$$\eta_{\text{брутто}} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6), \quad (2)$$

где  $q$  - потери тепла в %:

- $q_2$  - с уходящими газами;
- $q_3$  - из-за химического недожога горючих газов (СО, Н<sub>2</sub>, СН<sub>4</sub>);
- $q_4$  - с механическим недожогом;
- $q_5$  - от наружного охлаждения;
- $q_6$  - с физическим теплом шлаков.

Тогда К.П.Д.-нетто отопительного котла по уравнению обратного баланса:

$$\eta_{\text{нетто}} = \eta_{\text{брутто}} - q_{\text{с.н.}},$$

где  $q_{\text{с.н}}$  - расход энергии на собственные нужды, %.

Определение к.п.д. по уравнению прямого баланса проводят преимущественно при отчетности работы оборудования за отдельный период (декада, месяц), а по уравнению обратного баланса – при испытании отопительного котла. Вычисление к.п.д. отопительного котла по обратному балансу является более точным, так как погрешности при измерении потерь теплоты меньше, чем при определении расхода топлива [4].

На производстве, в котельной обычно пользуются прямым методом с использованием приборов учета тепла и расхода газа. При проведении режимно-наладочных работ пользуются методом обратного баланса с использованием газоанализаторов. Законодательно применение обоих методов допустимо.

Как правило к.п.д. котла определяется в ходе проведения режимно-наладочных испытаний и на устоявшемся режиме работы проводят одно измерение. Ряд авторов рассматривают вопросы внедрения информационных систем для оперативной диагностики работы КА [5, 6].

Определенный научный и практический интерес вызывает вопрос реализации оперативной идентификации к.п.д. КА в режиме реального времени с использованием сигналов датчиков САУ. Целью данной работы является проработка различных вариантов реализации системы оперативной диагностики к.п.д. КА.

**Вопрос оперативной идентификации к.п.д. брутто КА по прямому методу.** Из зависимости видно (1), что для осуществления процедуры идентификации требуется в реальном времени получать сигналы, которые информируют об изменении четырех величин:

- расхода воды через КА;
- температур воды на входе и выходе из КА;
- расхода топлива на горелки.

Величины  $Q_{нр}$  и  $c_v$  вводятся как константы.

Важным является наличие непрерывного электрического сигнала или опроса датчиков с высокой дискретизацией.

Погрешность определения к.п.д. в этом случае может быть вызвана как погрешностями измерения текущих значений величин (будет зависеть от качества применяемых датчиков и обработчика сигналов), так и погрешностями ввода констант процесса.

Следует понимать сложности интерпретации получаемых идентифицированных значений к.п.д. в нестационарных условиях работы котла. Понижение или повышение к.п.д. при переходных режимах может быть связано с процессами аккумуляции теплоты ограждающей конструкции КА. Идентифицированное значение представляет интерес при его совместном анализе с теми текущими условиями, для которых оно было получено.

**Вопрос оперативной идентификации к.п.д. брутто по обратному методу.** В общем случае с учетом возможной нестационарности условий работы КА к выражению (2) добавляется составляющая, связанная с аккумуляцией теплоты ограждающей конструкцией КА:

$$1 = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 \pm q_{ac}.$$

Для КА, работающего на газообразном топливе  $q_4=0$  и  $q_6=0$ , тогда:

$$\eta = q_1 = 1 - q_2 - q_3 - q_5;$$

$$q_2 = \frac{V_d \cdot c_d (t_d)}{V_m \cdot Q_n^p};$$

$$q_3 = \frac{\%CO \cdot V_d \cdot Q_{нр}^{CO}}{V_m \cdot Q_n^p};$$

$$q_5 = \frac{F_k \cdot \bar{k} \cdot (\overline{t_{нов}} - t_{ос})}{V_m \cdot Q_n^p}.$$

Перечень измеряемых величин для обеспечения данного варианта диагностирования:

- концентрация СО учитывается при помощи соответствующего датчика;
- температура дыма измеряется термопарой за последней поверхностью нагрева КА;
- температура характерной точки на наружной поверхности ограждающей конструкции КА;
- температура окружающей среды.

Расход дымовых газов идентифицируется с учетом предложенного в работе [7] способа идентификации значения коэффициента расхода воздуха, позволяющего анализировать неосушенные продукты сгорания.

В основе предложенной методики лежит использование расчета сжигания газообразного топлива со специально разработанными дополнениями. С помощью предлагаемой методики появляется возможность решения задачи идентификации значения коэффициента расхода воздуха и оценки газоплотности элементов КА и дымового тракта. Для реализации работы этого модуля необходимы данные о результатах измерения: расхода топлива, расхода вентиляторного воздуха, концентрации кислорода в продуктах сгорания, концентрации CO. Константы процесса  $Q_n^p$ ,  $c_o$ ,  $F_k$ ,  $\bar{k}$ ,  $Q_n^p$ ,  $Q_{np}^{CO}$ , концентрации всех основных компонентов топлива.

Расчет к.п.д. котлоагрегатов по прямому и обратному балансам используется для создания компьютерных программ автоматизированных систем управления теплогенерирующим оборудованием. Такие программы позволяют осуществлять автоматизированный расчет технико-экономических показателей котлоагрегатов, предназначены для определения технико-экономических показателей котлоагрегатов в соответствии с технологическими параметрами, расчет к.п.д. по прямому и обратному балансам, расчет тепловых потерь паровых и водогрейных котлов, определять суммарные потери тепла и другие показатели. В программе, наряду с её математическим и метрологическим обеспечением, реализуется системный подход к функционированию всей теплогенерирующей схемы совместно с балансом потребления топлива. Отображение исходных данных и результатов расчета в виде таблиц и графиков позволяет повысить достоверность информации, качество управления и энергоэффективность системы теплоснабжения в целом.

**Комплексная система диагностики.** В устоявшемся режиме работы важным условием корректности диагностики является согласованность в пределах заданной погрешности значений  $\eta_{брутто}^{np}$  и  $\eta_{брутто}^{обр}$ . При этом возможно уточнение расхода теплоты на аккумуляцию в нестационарных режимах работы. Важным инструментом для анализа энергоэффективности является концепция линии энергопотребления. Для ее построения, а в дальнейшем для сопоставления с ней, необходимо использовать значения к.п.д., полученные в установившемся процессе.

В ряде случаев возможно снижение значения к.п.д., которое может быть следствием изменения следующих параметров в процессе эксплуатации КА:

- наличие или рост присосов в КА;
- ухудшение теплоизолирующих свойств ограждающей конструкции;
- неполнота сгорания топлива;
- образование нагара на наружных поверхностях топочных экранов;
- отложение накипи на внутренней поверхности трубной системы.

Любая из вышеназванных проблем приводит к снижению к.п.д. (по сравнению со значением, взятым с соответствующей линией энергоэффективности).

Идентификацию конкретной проблемы необходимо проводить при помощи следующего алгоритма:

- в случае наличия в продуктах сгорания CO можно судить о неполноте сгорания топлива;

- существенное повышение коэффициента расхода воздуха, по сравнению со значением, формируемым за счет подачи дутьевого воздуха, позволяет судить об увеличении количества присосов, что в свою очередь может указывать на нарушение режима работы тягодутьевых установок или на нарушение газоплотности конструкции;

- повышение температуры уходящих газов при прочих равных условиях говорит об образовании нагара на наружной поверхности теплообменных труб или об образовании накипи на их внутренней поверхности.

Вместе с тем для ряда котлов типа ТГВ, НИИСТУ, ДКВР и аналогичных (в особенности работающих со щелевыми-подовыми горелками) существуют и другие причины ухудшения параметров горения топлива и снижения к.п.д. такие как дефекты внутренней обмуровки. Возможность выявления и устранения таких дефектов проблематична при эксплуатации агрегата, требует дополнительного обследования и ремонта во время простоя.

При наличии подробной и актуальной режимной карты КА можно учитывать соответствие фактических параметров эксплуатации параметрам, указанным в режимной карте. На основе отклонений можно делать выводы о тех или иных дефектах эксплуатации. К примеру, в режимных картах могут быть указаны положения регуляторов воздуха и газа (положение МЭО). При их неправильном положении может снижаться эффективность сгорания топлива.

Значительную часть параметров работы КА (кроме подробных характеристик уходящих газов) можно зафиксировать с помощью современной автоматики и КИП котлового агрегата, а также теплосчетчиков и корректоров объема газа. Таким образом, возможна организация регулярного и оперативного отслеживания к.п.д. котла.

Анализ параметров работы КА и его к.п.д. лучше всего проводить в периоды стабильной его работы (КА должен быть в работе минимум несколько дней, находится в стабильном режиме работы, не должно быть резких изменений погодных условий).

Тепловизионная диагностика поверхностей КА может не только выявить отдельные проблемные участки с высокими теплотерями, но и оценить фактические общие теплотери через стенки котла. Сравнивая фактические теплотери с паспортными, можно сделать вывод об общей эффективности работы КА.

**Выводы.** Оперативная идентификация к.п.д. брутто КА по прямому методу сопряжена с рядом нюансов, а именно: возникающей погрешности в следствие измерения текущих значений величин реальными приборами, а также погрешностями ввода констант процесса. Вместе с тем стоит отметить сложности интерпретации получаемых идентифицированных значений к.п.д. в нестационарных условиях работы котла.

Для реализации оперативной идентификации к.п.д. брутто по обратному методу необходимы данные о результатах измерения: расхода топлива, расхода вентиляторного воздуха, концентрации кислорода в продуктах сгорания, концентрации СО. Применение такого метода даёт существенно более высокий показатель к.п.д., и в месте с тем точность результата на порядок лучше.

В работе проработаны алгоритмические и приборные особенности реализации оперативного диагностирования КА. Рассмотрены вопросы реализации диагностирования брутто КА по прямому и обратному методам. Также выдвинута идея о целесообразности реализации в реальном времени диагностирования по прямому и обратному методам.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шкулова, Н. В. Метод повышения эффективности длительно эксплуатируемого теплообменного оборудования водогрейного котла ТВГ-8М / Н. В. Шкулова, Е. С. Иванова, Я. С. Гусейнов // Ресурсы Европейского Севера. Технологии и экономика освоения. – 2016. – № 3(05). – С. 59-69.
2. Сидоров, А. В. Утилизация теплоты дымовых газов котельных малой и средней мощности / Сидоров А. В., Свалова М. В. // Символ науки. – 2021. – №1. – С. 153–155.
3. Тепловой расчет котельных агрегатов: нормативный метод. – М.: «Энергия», 2000. – 380 с.



4. Гламаздин, П. М. Экологические аспекты модернизации водогрейных котлов большой мощности / П. М. Гламаздин, Д. П. Гламаздин, Ю. П. Ярмольчик // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2016. – №3. – С. 249–259.
5. Светчиков, С. Е. Информационная система водогрейных котлов КВГМ-20. / С. Е. Светчиков // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2015. – № 3 (27). – С. 148-153.
6. Автушенко, Н. А. Автоматические системы управления генерирующими мощностями энергосистемы / Н. А. Автушенко, Г. С. Ленецкий // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2015. – № 1 (46). – С. 86-95.
7. Бирюков, А. Б. Диагностирование присосов воздуха в котел / А. Б. Бирюков, П. А. Гнитиев // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2023. – № 3. – С. 46-51. – EDN OMALTZ.

*Поступила в редакцию 21.08.2024 г., рекомендована к печати 13.09.2024 г.*

#### ANALYSIS OF THE POSSIBILITIES OF IMPLEMENTING OPERATIONAL DIAGNOSTICS OF THE BOILER UNIT ENERGY EFFICIENCY LEVEL

*Biriukov A.B., Gnitiev P.A.*

The hardware and algorithmic features of the operational identification of the efficiency factors of a boiler unit using direct and reverse balance methods are analyzed. The work elaborates the algorithmic and instrumental features of the implementation of operational diagnostics of a boiler unit. The issues of implementing diagnostics of  $\eta_{\text{GROSS}}$  of a boiler unit using direct and reverse methods are considered. The idea has also been put forward about the feasibility of implementing real-time diagnostics using direct and reverse methods. It is noted that most of the operating parameters of the boiler unit can be recorded using modern automation and instrumentation of the boiler unit, as well as heat meters and gas volume correctors.

**Keywords:** boiler unit, net efficiency, gross efficiency, energy efficiency, useful heat.

**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.

**Гнитиев Павел Александрович**

кандидат технических наук, декан факультета металлургии и теплоэнергетики, доцент кафедры технической теплофизики ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: gnitiev.pavel@gmail.com

**Gnitiev Pavel Aleksandrovich**

Candidate of Technical Sciences, Dean of the Faculty of Metallurgy and Thermal Power Engineering, Associate Professor of the Department of Technical Thermophysics of Donetsk National Technical University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕГО СПОСОБА ПЕРЕРАБОТКИ  
ОСАДКОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СТОКОВ КОКОНОМОТАЛЬНОГО  
ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЧВОУЛУЧШАЮЩЕЙ КОМПОЗИЦИИ**

© 2024 *Хуррамова Н.М., Хуррамов М.Г., Назиров З.Ш., Хуррамова Д.М., Джураева Н.Б.*

---

В статье представлены результаты переработки осадки технологических стоков кокономотального производства с использованием солнечной установки. В фокусе помещается приспособление из железного листа с обезвоженными осадками. Для ускорения процессов осадки 4-5 раз перелопачиваются. Твердая фаза осадка содержит более 50% органических веществ, комплексы азота и фосфора. Процесс пастеризации проведен в режиме до 85-92°C, выдерживанием 20-30мин. Для получения композиции в качестве добавки использован водорослевой горный известняк с тониной размола 0,25 мм, 7% от массы высушенного осадка и добавляли при температуры 60-70°C перелопачиваем. Смесь можно использовать в качестве почвоулучшающей композиции в сельском хозяйстве. Способ обеспечивает утилизацию осадков и повышает экологическую безопасность окружающей среды.

**Ключевые слова:** осадки стоков кокономотального производства, солнечный установки, сушка, водорослевой известняк, почвоулучшающая композиция.

---

**Введение.** Анализ последних исследований и публикаций научно-технической информации показывает, что одним из перспективных направлений утилизации осадков сточных вод является использование их в качестве почвоулучшающей добавки в сельском хозяйстве, городском озеленении. Повторное вовлечение осадки стоков в сельскохозяйственном обороте позволяет расширить сырьевую базу страны и на этой основе увеличить масштабы производства. Кроме того, утилизация отходов позволяет частично заменить первичное сырье и эффективнее использовать природные богатства. Осадки технологических сточных вод в некоторых случаях являются более сильным агентом, влияющим на свойства почвы, чем навоз и минеральные удобрения и служат основным источником фосфорного питания растений, и при повышенных дозах практически отсутствует необходимость внесения минеральных удобрений [1-5].

Твердая фаза осадков технологических сточных вод кокономотального производства текстильного промышленности включает значительное количество органических веществ (более 50%), комплексы азота, фосфора и калия, что определяет целесообразность утилизации осадков в качестве почвоулучшающей добавки. Одной из основных проблем их использования является токсичность и неблагоприятные санитарно-гигиенические показатели осадков, не позволяющие напрямую использовать их в качестве почвоулучшающей добавки и органоминерального удобрения. [6-8].

Применяемые в настоящее время способы обезвреживания осадка, как правило, не обеспечивают требуемой степени детоксикации и обеззараживания требуют высоких затрат. Следует отметить, что осадки технологических сточных вод имеют несбалансированный состав основных элементов питания. Поэтому наибольшая урожайность полевых сельскохозяйственных культур может быть достигнута при добавлении к ним питательных элементов для компенсации несбалансированности.

Еще нужно учитывать важность процесса нейтрализации токсических веществ и снижения подвижности элементов. Поиск средств и способов их решения является актуальной задачей.

**Постановка задачи.** Целью данной работы является разработка наиболее доступных и эффективных ресурсосберегающих способов обезвреживания и утилизации осадков технологических сточных вод кокономотального производства с использованием водорослевого известняка Гиссарскую горную породу и солнечной энергии, с целью использования в качестве почвоулучшающей композиции в сельском и городском хозяйстве.

**Экспериментальные методы.** В качестве базового объекта были выбраны осадки технологических сточных вод кокономотального производства Шахриябзкой шелкомотальной фабрики. При проведении исследования использованы следующие методы измерения: гравиметрические, титриметрические, колориметрические, спектрофотометрические и электрометрические. Измерения проведены в соответствии с нормативно-технической документацией.

**Результаты и их обсуждение.** В таблице 1 представлен состав технологических сточных вод кокономотального производства. Потребляемая в производственном процессе вода загрязняется органическими веществами. Это продукты распада шелкового клея серицина, другие органические и неорганические соединения, частицы оболочек куколки естественного происхождения. Технологический процесс получения шелка-сырца основан на использовании воды в качестве размягчителя и растворителя серицина и жировосковых веществ, в которых происходят процессы размотки коконов и отварки шелковых нитей.

Таблица 1. Состав технологических сточных вод кокономотального цеха

№	Показатели	Единица измерения	Количества
1	Температура	°С	28-35
2	Запах (при 20°С)	балл	4,0±1,0
3	Взвешенные вещества	мг/дм <sup>3</sup>	200-350
4	Сухой остаток	мг/дм <sup>3</sup>	900-1200
5	Зольность сухого остатка	%	48-60
6	БПК <sub>полн.</sub>	мг/дм <sup>3</sup>	570-700
7	Водородный показатель	единиц рН	7-8,5
8	Азот аммонийный	мг/дм <sup>3</sup>	25-30
9	Сульфаты	мг/дм <sup>3</sup>	150-180
10	Жиры	мг/дм <sup>3</sup>	30-180
11	Фосфаты	мг/дм <sup>3</sup>	4-6
12	Осадок от объема воды за 2 часа отстаивания	%	2,2-2,5

При отварке коконов остается только 70% фиброина (волоконистого белкового соединения), все остальные вещества до 30% (серицин 20-30%; минеральные 1,1-1,7%, воскообразные и жировые 1,6-3,9%) с водой почти полностью растворяются в канализации.

По данным Л.Ю. Юнусова серицин содержит 379 аминокислотных остатков, в большом количестве содержит серицин, треонин, аспаргиновую и глутаминовую кислоты [9]. В результате на каждый 1 кг выработанного шелка-сырца образуется обычно 1,5-2 кг белковых отходов. Потребляемая в производственном процессе вода загрязняется органическими веществами.

Предлагаемый ресурсосберегающий способ состоит из следующих этапов:

1. Технологические сточные воды кокономотального производства напрямую выделяются в отдельные карты иловой площадки очистительных сооружений.

2. Процесс обезвоживания проводится естественной фильтрацией, нагрузка на иловую площадку в среднем составляла  $12 \text{ м}^3$  на  $1 \text{ м}^2$ . Как показали результаты наблюдения, 80% свободной воды в течение 20-25 мин. испаривается под действием силы тяжести. Несброженный осадок технологических сточных вод кокономотального производства хорошо выдаёт воду. Это объясняется тем, что в осадке содержится некоторое количество частички куколок, которые представляя собой своеобразный фильтр, армируют осадок.

В климатических условиях Узбекистана влажность уменьшается на 85-87%.

После выделения осадков, технологические сточные воды направляются обратно на биологическую очистку.

3. Процесс пастеризации обезвоженного осадка сточных вод проведен, термической обработкой при помощи воздействия концентрированного солнечного излучения. Режим обработки, нагревание осадка  $85-92^\circ\text{C}$ , с последующим выдерживанием в течение 20-30 мин. Температура в конце сушки до  $30-35^\circ\text{C}$ . При температуре около  $85^\circ\text{C}$ , происходит процесс дегельминтизации осадков.

На основе проведенных лабораторных исследований, на научной базе Карши ГУ были изготовлены, опытные установки для термической обработки обезвоженных осадков (рис. 1).

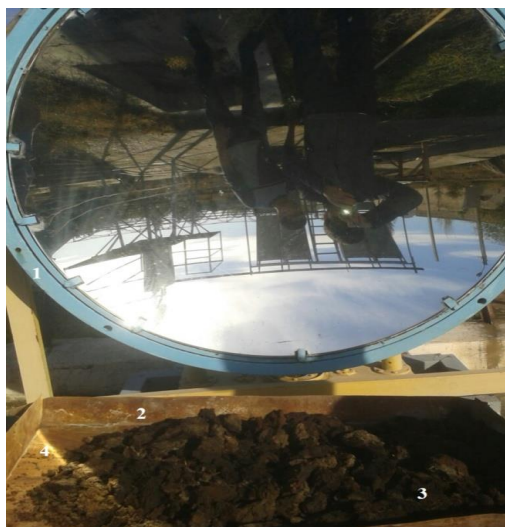


Рис.1. Процесс пастеризации осадок сточных вод кокономотального производства:  
1 - солнечный концентратор, 2 - приспособления из железного листа, 3 - осадки

Для обработки осадков параллельные солнечные лучи собираются с помощью вогнутого зеркала (1). В фокусе зеркала помещается приспособление из железного листа (2) с обезвоженными осадками. В фокусе зеркала температура поднимается до  $200^\circ\text{C}$  в течение 13-15 мин. Тепло из горячего железа передается за счет теплопроводности на массу осадков (3), а с ее поверхности в окружающую среду теплота уходит за счет конвекции. Нагретый воздух в приспособлении, является теплоносителем и одновременно переносчиком влаги, испарившийся из влажного материала. Нагревающие приспособления из железа обеспечивают равномерный обогрев осадков. Для равномерного и ускоренного процесса сушки осадков необходимо 4-5 раз перелопачивать.

4. Для получения почвоулучшающей композиции в качестве добавки был использован измельченный (в виде муки с тониной размола 0,25 мм) Гиссарский горный известняк естественного происхождения, 7% от массы высушенного ОСВ. Изучен химический состав водорослевого известняка Гиссарской горной породы в %: SiO<sub>2</sub>-5.2; TiO<sub>2</sub>-0.05; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-0.8; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+FeO-0.55; MnO-0.05; CaO-43.0; MgO-8.0; K<sub>2</sub>O-0.3; Na<sub>2</sub>O-0.05; H<sub>2</sub>O-0.75; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> -0.04; CO<sub>2</sub>-41.5; SO<sub>3</sub>-0.04; S-0.08. Режим обработки, нагревание смешенного осадка и известняка 60-70°C и выдержки в течение 5 суток.

Географическое расположение Узбекистана позволяет использовать солнечную энергию в процессе пастеризации. В течение года количество условных солнечных дней изменяется в пределах 250-270 дней. Годовое поступление солнечной энергии на 1 м<sup>2</sup>, в Узбекистане составляет более 1600 кВт·ч. Экстремальные значения интенсивности прямой радиации на перпендикулярную поверхность в безоблачные дни в полдень составляет 950-1050 Вт/м<sup>2</sup>, (максимальные) и 530-600 Вт/м<sup>2</sup>, (минимальные). Солнечный свет включает в свой состав ультракороткие волны с длиной волны меньше 400нм (это УФ-свет). Интенсивность УФ-радиации круглый год остается почти одной и той же (2.1-2.7 мкал/см<sup>2</sup> мин) [10].

УФ излучение относится к ионизирующей радиации, которая способна ионизировать атомы и разрывать ковалентные связи в молекулах и отличается значительной биологической активностью. При солнечной сушке воздействие ультрафиолетового обезвреживания заключается в прямом разрушительном воздействии излучения на нуклеиновые кислоты, входящие в состав ДНК и РНК всех живых организмов в осадке. Нуклеотиды, составляющие ДНК и РНК, очень сильно поглощают УФ излучение с длиной волны в интервале 220-290 нм с максимумом 260 нм. При этом нуклеотиды повреждаются, и в них блокируется процесс воспроизводства клеток и значительно сокращается скорость размножения бактерий [11]. После солнечной сушки, сокращается объем осадков и повышается теплотворная способность ила и биогенных компонентов.

Анализ полученных данных показал, что на выходе содержание сухой массы осадков составляет 85-90%. После солнечной сушки осадок представляет собой не загнивающую, внешне сухую (влажностью 9-10%), сыпучую, свободную от гельминтов и патогенных микроорганизмов массу.

Технические параметры установки: Диаметр зеркала концентратора-3200 мм; Радиус зеркала концентратора-1600 мм; Фокусные расстояния -1160 мм; КПД- 40%; установка малотоннажная, автономная, работает периодически, производительность 100-110 кг/час; площадь приспособления из железа 2,5 м<sup>2</sup>; поглощающая способность приспособления 0,44, теплоемкость 0,50 Кдж/(кг·град), плотность 7860 кг/м<sup>3</sup>, теплопроводность 47, Вт/(м·град). В процессе обработки толщина слоя осадков составляет 120-150 мм.

Проведенный экспериментальный опыт показывает, что полученный продукт является экологически безопасным и пригодно для использования.

**Выводы.** Созданный способ переработки осадков технологических стоков кокономотального производства позволяет решить вопросы не только ресурсосбережения, но и повышения экологической безопасности окружающей среды и одновременно сохранить их ценные агрохимические свойства.

Эффективная сушка осадков при низких температурах проста в эксплуатации и не требует квалифицированного труда, осуществляется посредством автономных источников энергии, обеспечивающих соблюдение противопожарных требований. При этом снижается себестоимость переработки и повышается удобность доставки сырья за счет уменьшения массы сырья. Обеспечивается полная утилизация осадков без образования отходов и появляется дополнительный доход от реализации полученной продукции, которая может использоваться в качестве почвоулучшающей добавки в сельском и городском хозяйстве, зеленом строительстве. Этот способ может быть применен практически для любых централизованных очистных сооружений страны.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Применение однокомпонентных и комплексных удобрений: рекомендации / В. Н. Босак, О. Б. Дормешкин, А. Ф. Минаковский [и др.]. – Минск: БГТУ, 2018. – 30 с.
2. Использование осадков сточных вод в качестве органоминеральных удобрений / В. А. Бондаренко, Г. И. Бельков, А. А. Цыцура, В. М. Николаев. – Оренбург: Изд-во ОГУ, 2000. – 124 с.
3. Применение органических удобрений в интенсивном земледелии: рекомендации / И. Р. Вильдфлуш, Т. Ф. Персикова, П. А. Саскевич [и др.]. – Горки: БГСХА, 2015. – 50 с.
4. Новикова, О. К. Обработка осадков сточных вод: учеб.-метод. пособие / О. К. Новикова. – Гомель: БелГУТ, 2015. – 96 с.
5. Пахненко, Е. П. Осадки сточных вод и другие нетрадиционные органические удобрения / Е.П. Пахненко. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 311 с.
6. ГОСТ Р 17.4.3.07-2001. Охрана природы. Почвы. Требования к свойствам осадков сточных вод при использовании их в качестве удобрений: государственный стандарт РФ: дата введения 2001-10-01 / Государственный стандарт Российской Федерации. – Изд. официальное. – М.: Стандартинформ, 2008. – 5 с.
7. ГОСТ Р 54534-2011. Ресурсосбережение. Осадки сточных вод. Требования при использовании для рекультивации нарушенных земель: национальный стандарт РФ: дата введения 2013-01-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – Изд. официальное. – М: Стандартинформ, 2012. – 7 с.
8. ГОСТ Р 54651-2011. Удобрения органические на основе осадков сточных вод: технические условия: дата введения 2011-12-13 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – Изд. официальное. – М: Стандартинформ, 2012. – 14 с.
9. Юнусов, Л. Ю. Физико-химические свойства натурального шелка в процессе переработке коконов / Л. Ю. Юнусов. – Ташкент, Наука, 1978. – 146 с.
10. Предварительные результаты оценки солнечных ресурсов: Отчет Проекта АБР UZB TA 8008 / Ш. Файзиев, Н. Гёдер, Э. Люпферт. – Ташкент, 2013. – 42 с.
11. Санитарно-вирусологический контроль эффективности обеззараживания питьевых и сточных вод УФ-излучением: методические указания МУК 4.3.2030–05. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2006. – 20 с.

*Поступила в редакцию 04.06.2024 г., рекомендована к печати 05.07.2024 г*

**INVESTIGATION OF A RESOURCE-SAVING METHOD OF PROCESSING SLUDGE OF TECHNOLOGICAL WASTEWATER OF COCONUT REELING PRODUCTION TO OBTAIN A SOIL-IMPROVING COMPOSITION**

*KHurramova N.M., KHurramov M.G., Nazirov Z.SH., KHurramova D.M., Dzhuraeva N.B.*

The article presents the results of processing the sediment of technological wastewater from cocoon-winding production using a solar installation. In focus is placed a device made of iron sheet with dehydrated sediment. To speed up the processes, the sediment is shoveled 4-5 times. The solid phase of the sediment contains more than 50% of organic matter, nitrogen and phosphorus complexes. The pasteurization process was carried out in the mode of up to 85-92 ° C, holding for 20-30 minutes. To obtain the composition, algal mountain limestone with a grinding fineness of 0.25 mm, 7% of the mass of dried sediment was used as an additive and added at a temperature of 60-70 ° C by shoveling. The mixture can be used as a soil-improving composition in agriculture. The method ensures the utilization of sediment and improves the environmental safety of the environment.

**Keywords:** cocoon winding production sludge, solar installations, drying, algal limestone, soil-improving composition.

**Хуррамова Наргиза Мухторовна**

ассистент кафедры технологического образования Каршинского государственного университета, Узбекистан, г. Карши.  
E-mail: nargiza-xurramova@mail.ru

**KHurramova Nargiza Mukhtorovna**

Assistant at Department of Technological education of Karshi State University, Uzbekistan, Karshi.

**Хуррамов Мухтор Гулович**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологического образования Каршинского государственного университета, Узбекистан, г. Карши.  
E-mail: khurramov58@mail.ru

**KHurramov Mukhtor Gulovich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of Technological education of Karshi State University, Uzbekistan, Karshi.

**Назирова Зулхайнар Шаропович**

кандидат технических наук, доцент кафедры технологического образования Каршинского государственного университета, Узбекистан, г. Карши.  
e-mail: nazirovzsh@mail.ru

**Nazirov Zulkainar SHarapovich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Technological education of Karshi State University, Uzbekistan, Karshi.

**Хуррамова Дилобар Мухторовна**

ассистент кафедры экологии Международного инновационного университета, Узбекистан, г. Карши.  
E-mail: dilobar-xurramova@mail.ru

**KHurramova Dilobar Mukhtorovna**

Assistant of the Department of Ecology of the International Innovation University, Uzbekistan, Karshi.

**Джураева Нигина Баходировна**

студент Шахрисабзского государственного педагогического института, Узбекистан, г. Шахрисабз.  
E-mail: doniyordjuraev290@gmail.com

**Dzhuraeva Nigina Bakhodirovna**

Student of Shakhrisabz State Pedagogical Institute, Uzbekistan, Shakhrisabz.

## 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](mailto: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.
  - **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 абзацным 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 *xx.xx.20xx г.*, рекомендована к печати *xx.xx.20xx 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 681.5:621.377

## ЭЛЕМЕНТЫ УСТРОЙСТВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ ДЛЯ АСНИ КОНТРОЛЯ РАДИООБСТАНОВКИ

© 2024 Третьяков И.А., Данилов В.В.

---

Приведены описания элементов устройств вычислительной техники для создания специализированных автоматизированных систем научных исследований контроля радиобстановки на основе эхо-эффекта. Приведен механизм формирования фоннного эха.

**Ключевые слова:** АСНИ, радиобстановка, эхо-эффект, фоннное эхо, обработка радиосигналов.

---

**Введение.** Важнейшим элементом современной концепции [1-3] ...

**Механизм формирования сигналов.** Электрическая компонента первого [4] ...

**Выводы.** Таким образом, рассмотренные элементы позволяют ...

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Третьяков, И. А. Элементы устройств вычислительной техники для АСНИ контроля радиобстановки 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 25.01.2024).

*Поступила в редакцию xx.xx.2024 г., рекомендована к печати xx.xx.2024 г.*

### ELEMENTS OF COMPUTING DEVICES FOR ASRS CONTROL OF RADIO PLACEMENT

*Tretiakov I.A., Danilov V.V.*

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.

**Keywords:** ASRS, radio substitution, echo effect, phonon echo, radio signal processing.

#### **Третьяков Игорь Александрович**

кандидат технических наук, 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, Deputy Dean for Research, 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 радиофизики 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:

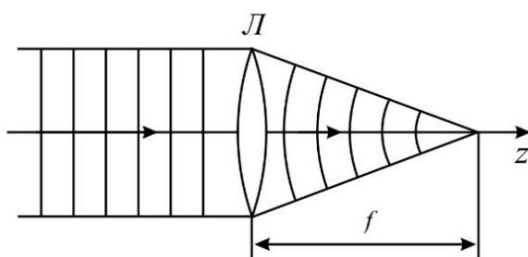


Рис. 1. Действие линзы на плоскую волну

Таблица 1. Номиналы элементов схемы УМ класса F<sub>3</sub>

Элемент	Номинал	Единица измерения
C <sub>out</sub>	25	пФ
C <sub>1</sub>	10	нФ
C <sub>2</sub>	100	мкФ
L <sub>1</sub>	150	мкГн
L <sub>2</sub>	460	нГн
L <sub>3</sub>	765	нГн
R <sub>1</sub>	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](mailto:vestnik.g@mail.ru)

*Научное издание*

**Вестник Донецкого национального университета.  
Серия Г: Технические науки**

**– 2024. – № 3.**

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](mailto:vestnik.g@mail.ru)

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

---

Подписано в печать 01.10.2024 г.

Формат 60×84/8. Бумага офсетная.

Печать – цифровая. Усл. печ. л. 22,44.

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.