

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

№3(31)
2025

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Севастопольский государственный университет»

Выходит 4 раза в год

ISSN 2658-4727

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И
ИЗМЕРЕНИЯ В МАШИНО-
ПРИБОРОСТРОЕНИИ**
НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Севастополь, 2025

Главный редактор
Филипович О.В., к.т.н., доц.
(г. Севастополь)
Заместитель главного
редактора
Балакин А.И., к.т.н., доц.
(г. Севастополь)
Научный редактор
Бохонский А.И., д.т.н., проф.
(г. Севастополь)

Редакционная коллегия
Вартанов М.В., д.т.н., проф.
(г. Москва)
Греков Н.А., д.т.н., проф.
(г. Севастополь)
Доронина Ю.В., д.т.н., доц.
(г. Севастополь)
Жмудь В.А., д.т.н., доц.,
(г. Новосибирск)
Краснодубец Л.А., д.т.н., проф.
(г. Севастополь)
Моисеев Д.В., д.т.н., доц.
(г. Севастополь)
Обжерин Ю.Е., д.т.н., проф.
(г. Севастополь)
Осипов К.Н., д.т.н., доц.
(г. Севастополь)
Песчанский А.И., д.т.н., проф.
(г. Севастополь)
Петрешин Д.И., д.т.н., проф.
(г. Брянск)
Прейс В.В., д.т.н., проф.
(г. Тула)
Щенятский А.В., д.т.н., проф.
(г. Севастополь)
Заморёнов М.В., к.т.н., доц
(г. Севастополь)
Майстришин М.М., к.т.н., доц.
(г. Севастополь)
Рапакский Ю.Л., к.т.н., доц.
(г. Севастополь)

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ

- Палаев С.В., Безуглый Н.Н., Черменева И.П.** Применение векторных баз данных для анализа компьютерных сетей предприятий 4
Заморенов И.М., Моисеев Д.В., Заморенов М.В. Анализ надежности измерительной подсистемы при автоматическом управлении параметрами микроклимата в производственных помещениях 15
Молчанов Д.В. Управление турбодетандером: сравнение традиционного PID-регулирования и моделей на основе машинного обучения 20

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

- Доронина Ю.В., Луцишин Т.О., Даниленко В.Е.** Алгоритмизация гетерогенной интеграции в автономных структурно нестационарных групп беспилотных объектов 31
Мороз В.А., Моисеев Д.В. Математическая модель расчета концентраций химических веществ брызгальных бассейнов ответственных потребителей АЭС 41
Рубцов Ю.В. Оценка метода машинного обучения для системы автоматизированного выбора компонентной базы для радиоэлектронной аппаратуры 47
Варминская Н.И. Асимптотическое свойство энергетического принуждения при моделировании оптимального движения объектов 60
Заморёнов М.В., Моисеев Д.В., Малицкая А.А., Ченгарь О.В. Верификация модели оценки надежности электродвигателя с учетом диагностики износа подшипников 66
Чернега В.С., Арбузов И.А., Лушина В.С., Еременко С.А. Измерение и моделирование влияния параметров тулиевого волоконного литотриптера на длительность дробления камней мочеочочника 72
Филипович О.В. Верификация модели селективной сборки двух элементов, учитывающей влияние погрешностей измерения на показатели процесса 81

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

- Волобуев К.А., Москалева В.М., Трубин И.В., Трубин В.Г.** Основы и некоторые особенности работы с цифровым осциллографом 87
Липко И.Ю., Якунин Р.Д. Определение размеров объектов по изображению путём их сопоставления с шахматной доской известного размера 103
Балакина Н.А. Анализ точности устройств размерной сортировки деталей 108

Подписной индекс научного журнала 85768 по интернет-каталогу «Пресса России».

Научный журнал входит в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук», утвержденный ВАК Минобрнауки РФ, по следующим научным специальностям:

- 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ производствами (технические науки);
- 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды производствами (технические науки);
- 2.3.3 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки).

Учредитель и издатель: ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» ул. Университетская, 33. Севастополь, 299053.

Editor-in-Chief

Filipovich O.V., candidate of technical sciences, docent (Sevastopol)

Deputy Editor-in-Chief

Balakin A.I., candidate of technical sciences, docent (Sevastopol)

Scientific Editor

Bokhonsky A.I., doctor of technical sciences, professor (Sevastopol)

Editorial Board

Vartanov M.V., doctor of technical sciences, professor (Moscow)

Grekov N.A., doctor of technical sciences, professor (Sevastopol)

Doronina Yu.V., doctor of technical sciences, docent (Sevastopol)

Zhmud V.A., doctor of technical sciences, docent (Novosibirsk)

Krasnodubets L.A., doctor of technical sciences, professor (Sevastopol)

Moiseev D.V., doctor of technical sciences, docent (Sevastopol)

Obzherin Yu.E., doctor of technical sciences, professor (Sevastopol)

Osipov K.N., doctor of technical sciences, docent (Sevastopol)

Peschanskiy A.I., doctor of technical sciences, professor (Sevastopol)

Petreshin D.I., doctor of technical sciences, professor (Bryansk)

Preis V.V., doctor of technical sciences, professor (Tula)

Schenyatsky A.V., doctor of technical sciences, professor (Sevastopol)

Zamoryonov M.V., candidate of technical sciences, docent (Sevastopol)

Maystrishin M.M., candidate of technical sciences, docent (Sevastopol)

Rapatsky Yu.L., candidate of technical sciences, docent (Sevastopol)

CONTENTS

AUTOMATION AND CONTROL OF PROCESSES AND PRODUCTIONS

- Palaev S.V., Bezuhliy N.N., Chermeneva I.P.** Application of vector databases for analysis of computer networks of enterprises 4
- Zamoryonov I.M., Moiseev D.V., Zamoryonov M.V.** Reliability assessment of sensing systems in automated indoor climate control for industrial spaces 15
- Molchanov D.V.** Turbo expander control: a comparison of traditional PID control and machine learning models 20

MATHEMATICAL MODELLING, NUMERICAL METHODS AND SOFTWARE PACKAGES

- Doronina Yu.V., Lutsishin T.O., Danilenko V.E.** Algorithmization of heterogeneous integration in autonomous structurally unstable groups of unmanned objects 31
- Moroz V.A., Moiseev D.V.** Mathematical model for calculating concentrations of chemicals in splash pools of responsible consumers of nuclear power plants 41
- Rubtsov Yu.V.** Evaluation of the machine learning method for the automated selection system of component base radio-electronic equipment 47
- Varminskaya N.I.** Energy enforcement asymptotic property in objects' optimal motion modeling 60
- Zamoryonov M.V., Moiseev D.V., Malitskaya A.A., Chengar O.V.** Verification of an electric motor reliability assessment model with bearing wear diagnostics accounting 66
- Chernega V.S., Arbuzov I.A., Lushina V.S., Eremenko S.A.** Measurement and modeling of the influence of thulium fiber lithotripter parameters on the duration of ureteral stone fragmentation 72
- Filipovich O.V.** Verification of the model of selective assembly of two elements, taking into account the influence of measurement errors on the process indicators 81

MEASURING INSTRUMENTS AND METHODS

- Volobuev K.A., Moskaleva V.M., Trubin I.V., Trubin V.G.** Basics and some features of working with a digital oscilloscope 87
- Lipko I.U., Yakunin R.D.** Determining the size of objects in an image by comparing them with a chessboard of known size 103
- Balakina N.A.** Accuracy analysis of dimensional sorting devices 108

Subscription index of the scientific journal is 85768 according to the Internet catalogue "Press of Russia".

The scientific journal is included in the "List of peer-reviewed scientific editions, in which the main results of dissertations for the degree of Candidate of sciences, for the degree of Doctor of sciences should be published", approved by the Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, in the following scientific specialties:

1.2.2. Mathematical modeling, numerical methods and software packages

2.2.8. Methods and devices for monitoring and diagnostics of materials, products, substances and the natural environment

2.3.3. Automation and control of technological processes and productions

Founder and publisher: FSAEI HE «Sevastopol State University» ul. Universitetskaya, 33. Sevastopol, 299053.

© FSAEI HE «Sevastopol State University»

© Authors of the articles

**ПРИМЕНЕНИЕ ВЕКТОРНЫХ БАЗ ДАННЫХ ДЛЯ АНАЛИЗА
КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Палаев С.В.¹, Безуглый Н.Н.², Черменева И.П.³

**APPLICATION OF VECTOR DATABASES FOR ANALYSIS OF
COMPUTER NETWORKS OF ENTERPRISES**

Palaev S.V.¹, Bezuhliy N.N.², Chermeneva I.P.³

***Аннотация.** Рассматривается применение векторных баз данных для анализа компьютерных сетей предприятий, а также их ключевые преимущества, методы интеграции в существующие системы и примеры успешного использования. Исследованы технологии векторных баз данных, которые могут способствовать улучшению безопасности, увеличению эффективности и повышению устойчивости компьютерных сетей предприятий.*

***Abstract.** The application of vector databases for the analysis of enterprise computer networks is considered, as well as their key advantages, methods of integration into existing systems and examples of successful use. Vector database technologies that can contribute to improving security, increasing efficiency and increasing the sustainability of enterprise computer networks are studied.*

***Ключевые слова.** Векторная база данных, сетевая инфраструктура, анализ данных, преобразование данных.*

***Keywords.** Vector database, network infrastructure, data analysis, data transformation.*

Введение.

С ростом объема данных и усложнением компьютерных систем управление и анализ информации становятся критически важными для обеспечения эффективной работы сетевой инфраструктуры. Векторные базы данных позволяют хранить и обрабатывать данные в виде векторов, что открывает новые возможности для анализа и обработки информации. Их применение в области компьютерных сетей предприятий позволяет не только ускорить поисковые операции, но и повысить точность анализа, что особенно важно в условиях динамической среды.

Векторизация данных предоставляет возможность представлять сложные объекты, такие как текстовые документы, изображения и метрики

производительности, в компактной и удобной для обработки форме. Это позволяет применять современные методы машинного обучения и анализа данных для выявления закономерностей, аномалий и предсказания поведения сетевых систем. Например, векторные базы данных могут использоваться на предприятии для мониторинга сетевой безопасности, анализа производительности, оптимизации распределения ресурсов и прогнозирования сбоев [1].

Целью работы является повышение эффективности анализа компьютерных сетей предприятия на основе векторного представления данных.

Популярность векторных баз данных для анализа сетей.

Векторные базы данных:

- оптимизированы для хранения и обработки данных, что позволяет быстро выполнять операции над большими объемами информации и особенно полезно в сетевых приложениях предприятий, где объемы данных могут быть значительными;

- позволяют эффективно выполнять поиск по сходству, а значит быстро находить объекты, которые похожи на заданные, что важно для анализа аномалий или паттернов в сетевых данных, например, можно выявлять сетевые атаки на предприятие с учетом похожих паттернов поведения;

- легко интегрируются с алгоритмами машинного обучения, что позволяет применять модели для анализа сетевых данных, появляется возможность автоматизировать процессы, классификации, кластеризации и прогнозирования;

- позволяют представлять различные типы информации (текст, изображения, метрики) в едином формате для упрощения их анализа и визуализации, что особенно актуально для сетевых систем при поступлении данных из различных источников;

- поддерживают обработку данных в реальном времени, что позволяет анализировать данные по мере их поступления; это критически важно для мониторинга сетевой безопасности и производительности, где время реакции имеет большое значение;

- адаптируются к изменениям в структуре данных, что позволяет легко добавлять новые типы данных или изменять существующие без необходимости серьезных перестроек системы [2].

Векторные базы данных предлагают мощные инструменты для анализа компьютерных сетей предприятий, обеспечивая высокую производительность, гибкость и возможность интеграции с современными методами анализа данных. Их применение способствует улучшению безопасности, повышению эффективности и устойчивости сетевых систем

в условиях постоянно растущих объемов данных.

Структура векторных баз данных.

Структура векторных баз данных включает:

– векторные представления (эмбеддинг) для преобразования данных любого типа (текст, изображения, аудио, видео) в плотный числовой вектор, то есть массив чисел (Рис.1). Это координаты в многомерном пространстве, где каждое измерение представляет отдельную особенность элемента.

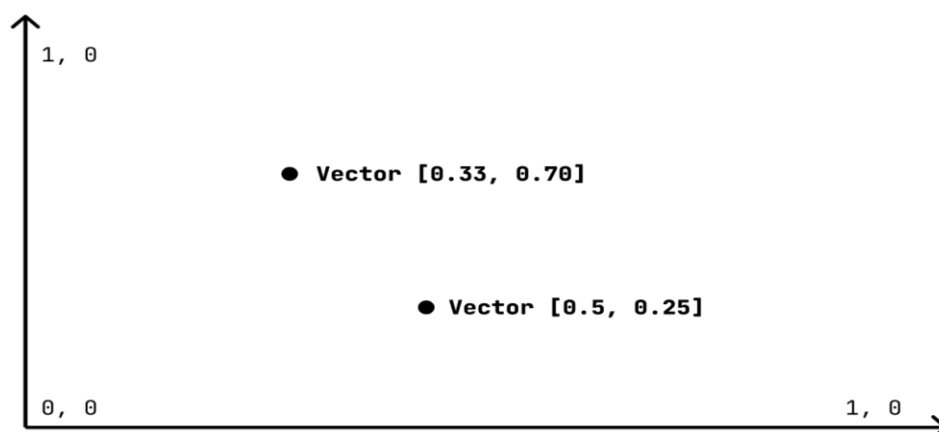


Рис.1 – Вектор

Вместо того чтобы хранить или искать данные по их прямому содержанию они пропускаются через специальную модель (обычно нейронную сеть, тренированную для создания эмбеддингов), которая "сжимает" информацию из исходных данных в компактный вектор чисел, а также захватывает семантическое значение, контекст или важные характеристики исходных данных. Например, эмбеддинги для текста будут отражать смысл слов или предложений, а эмбеддинги для изображений - их визуальное содержание (Рис.2) [3].



Рис.2 – Создание эмбеддингов

Основное свойство векторных представлений в том, что похожие по смыслу или содержанию данные преобразуются в векторы, которые находятся «близко» друг к другу в многомерном векторном пространстве,

а расстояние между векторами (например, косинусное сходство) соответствует степени сходства между исходными данными. Операции поиска информации, хранимой в векторной базе, осуществляется на основе принципа сходства векторов. Когда посылается поисковый запрос, он также преобразуется в вектор, и база данных ищет в своей коллекции векторы, которые наиболее близки к вектору запроса. Таким образом, вы находите данные, которые семантически похожи на ваш запрос, а не просто содержат те же ключевые слова (Рис.3). При выполнении запроса он преобразуется в вектор поиска, и база данных ищет область карты, к которой полученный вектор относится. Обнаружив искомую область, быстро находятся все векторы, находящиеся рядом с ним [3,4].

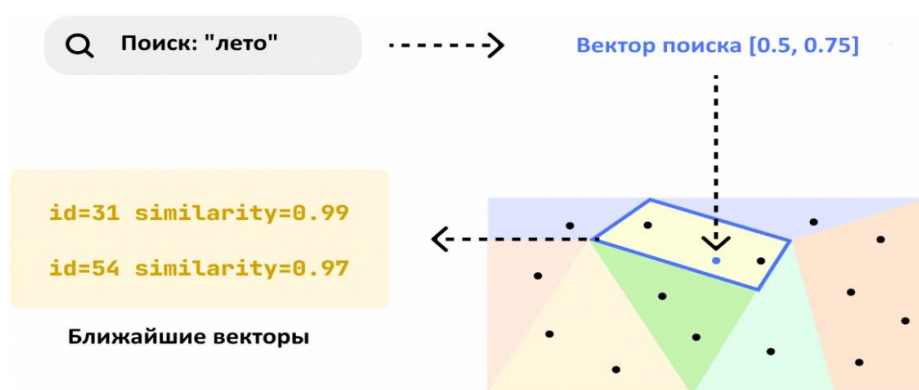


Рис.3 – Векторный поиск

Поэтому векторное представление можно представить в виде «числового отпечатка» данных, который позволяет компьютеру понять их смысл или содержание и сравнивать их с другими данными по их сходству, а не только по точному совпадению. Векторные базы данных созданы специально для работы с этими "отпечатками" и быстрого поиска похожих векторов.

– индексы для ускорения поиска векторов по их сходству среди большого количества. Им не нужен способ определения сходства векторов путем полного перебора между запросным вектором и каждым вектором, хранящимся в базе, так как данный способ является крайне медленным и ресурсоемким особенно при работе с большим количеством векторов. Суть векторного индекса состоит в структуризации многомерного векторного пространства путем: разделения пространства на области, например, с помощью деревьев, таких как KD-деревья (Рис.4).

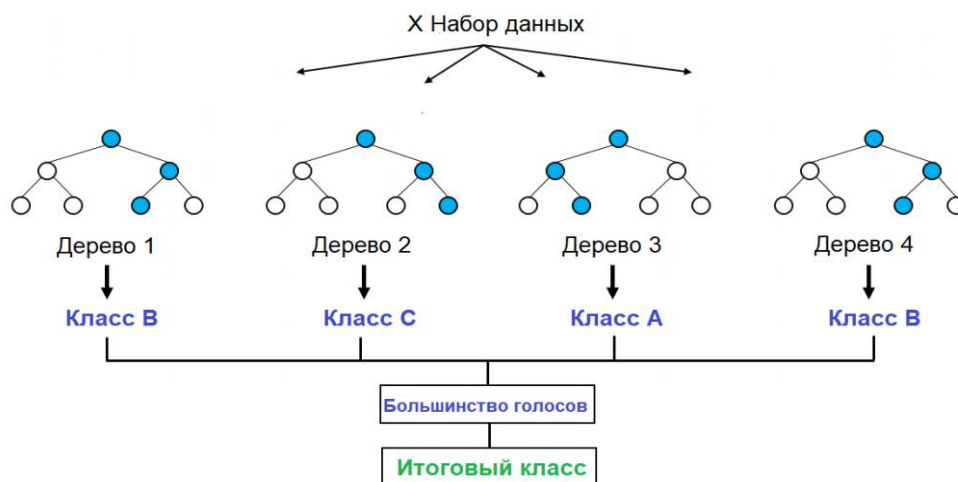


Рис.4 – KD-деревья

– группировки похожих векторов (кластеризация/квантование); построение графа, где узлы – это векторы, а ребра соединяют потенциально близких соседей (является одним из самых популярных и эффективных типов индексов на данный момент).

Векторные индексы делают поиск по сходству в больших масштабах быстрым и практичным, реализуя алгоритмы приближенного поиска ближайших соседей вместо медленного полного перебора (Рис.5) [5].

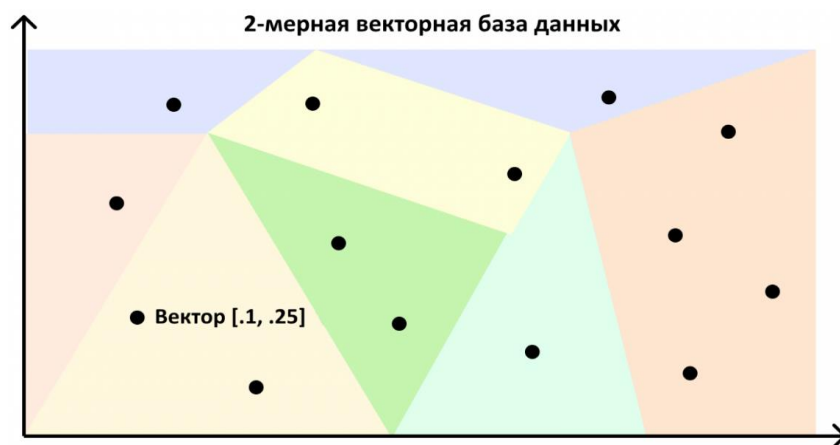


Рис.5 – Индексация векторов

– метрики расстояния для оценки сходства между векторами: евклидово расстояние, которое измеряет «прямое» расстояние между двумя точками в пространстве; косинусное расстояние, которое оценивает угол между двумя векторами, что полезно для определения схожести направлений; манхэттенское расстояние, для измерения суммы абсолютных различий между координатами.

– хранилище данных, с различными механизмами хранения данных, включая реляционные базы данных, когда некоторые векторные базы данных могут быть построены на основе традиционных реляционных баз; NoSQL базы данных, когда векторные базы данных могут использовать

NoSQL решения, которые обеспечивают гибкость и масштабируемость [6].

- набор правил и протоколов, для взаимодействия друг с другом; это позволяет разработчикам легко интегрировать их в приложения и системы, пример, возможность выполнения запросов на поиск по вектору, добавление новых векторов и извлечение информации о векторах [7].

Таким образом, структура векторных баз данных сочетает в себе векторные представления, индексы, метрики расстояния и механизмы хранения для эффективного управления большими объемами данных с ускорением операции поиска и анализа. Это делает векторные базы данных мощным инструментом для работы с данными в различных приложениях, включая анализ компьютерных сетей, обработку естественного языка и машинное обучение.

Этапы преобразования данных в векторных базах:

- сбор данных из различных источников – баз данных, файлов, сенсоров и т.д., примеры, сбор текстов, изображений, метрик производительности и других данных, которые будут использоваться для векторизации;

- предобработка данных для их очищения и подготовки для векторизации, которая включает удаление шумов и ненужной информации; нормализацию или стандартизацию данных, преобразование форматов данных в более подходящий вид;

- векторизация данных для их преобразования в векторные представления в виде многомерных векторов фиксированной длины с использованием различных методов векторизации;

- хранение векторов в векторной базе данных, причем векторы могут храниться в таблицах или специализированных структурах данных, оптимизированных для быстрого поиска и сопоставления;

- индексация для ускорения поиска и анализа векторов с применением различных методов для быстрой обработки запросов на похожесть;

- поиск и анализ для выполнения запросов к векторной базе данных при поиске, анализе и извлечения информации;

- обновление и переобучение векторных представлений по мере поступления новых данных или изменений условий применения методов регулярного переобучение моделей векторизации и обновление векторов в базе данных для поддержания её актуальности.

Этапы обеспечивают эффективное преобразование и хранение данных в векторных базах, что позволяет использовать их для различных задач, включая анализ, поиск и машинное обучение. Векторизация данных является ключевым процессом, который открывает возможности для более глубокого анализа и извлечения знаний (Рис.6) [8,10].

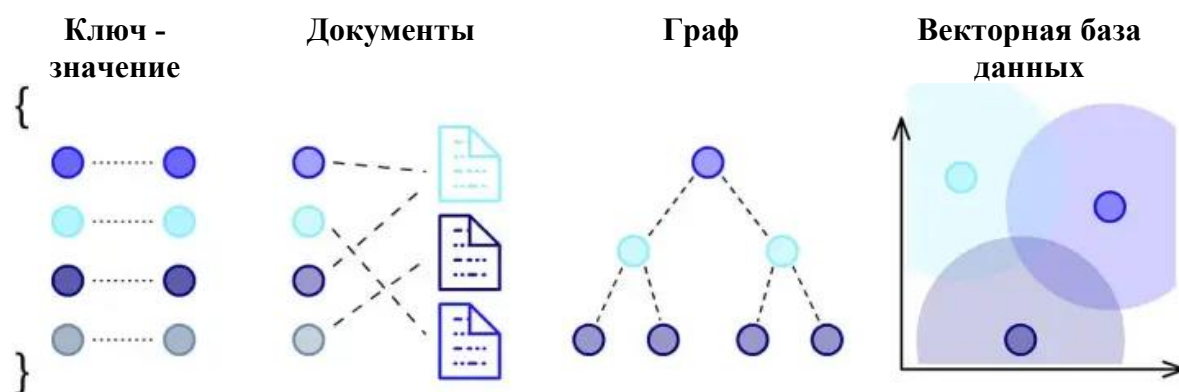


Рис.6 – Этапы векторизации данных

Последовательность представления компьютерной сети предприятия в векторной базе данных.

Последовательность включает следующие шаги:

- определение аспектов компьютерной сети подлежащих анализу и какие данные для этого необходимы, примеры, анализ производительности сети, мониторинг безопасности, выявление аномалий и т.д.;

- сбор данных о состоянии сети предприятия: логи сетевых устройств (маршрутизаторов, коммутаторов), метрики производительности (загрузку процессоров, пропускную способность), информации об узлах и соединениях (IP-адреса, MAC-адреса), примеры, использование протокола управления сетями для сбора метрик или парсинг логов;

- предобработка данных путем очистки и подготовки данные для векторизации: удаление ненужных или дублирующих данных; нормализация данных для обеспечения единообразия (например, преобразование IP-адресов в числовой формат), примеры, удаление шумов из логов, преобразование форматов данных;

- векторизация данных путем их преобразования в векторные представления с применением методов векторизации: для текстовых данных (например, описание узлов) рекомендуются методы TF-IDF, Word2Vec или BERT, для числовых данных (например, метрики производительности) используйте методы нормализации и масштабирования, для структурированных данных (например, таблиц) используются методы извлечения признаков, примеры, векторизация логов с помощью NLP-техник;

- хранение векторных представлений в векторной базе данных, определение структуры хранения (таблицы или специализированные структуры) для обеспечения быстрого доступа к данным;

- индексация векторов путем создания индексов для ускорения поиска и сопоставления векторов с применением методов: KD-деревьев, LSH или HNSW для оптимизации запросов на похожесть;

- поиск и анализ путем реализации интерфейса для выполнения

запросов к векторной базе данных, позволяя пользователям выполнять поиск, анализ и визуализацию данных, примеры, поиск аномалий в сетевых данных, анализ производительности;

– мониторинг и обновление для отслеживания состояния сети предприятия и обновления векторных представлений по мере поступления новых данных, методы: регулярное переобучение моделей векторизации и обновление векторов в базе данных.

Следуя этой последовательности шагов, можно представить информацию о компьютерной сети предприятия в векторной базе данных, что позволит проводить анализ, выявлять аномалии и оптимизировать работу сети [9,10].

Пример преобразования компьютерной сети предприятия в векторную базу данных.

Пусть задана компьютерная сеть предприятия:

– структура сети: топология – звезда;
– сетевые элементы: маршрутизатор (Router), коммутатор (Switch), клиенты (Clients) - 5 рабочих станций.

Сбор данных о сети:

– маршрутизатор: IP-адрес: 192.168.1.1, MAC-адрес: 00:1A:2B:3C:4D:5E, пропускная способность: 1000 Mbps;
– коммутатор: IP-адрес: 192.168.1.2, MAC-адрес: 00:1A:2B:3C:4D:5F, пропускная способность: 100 Mbps;
– клиенты (5 клиентов): IP-адреса: 192.168.1.3 - 192.168.1.7, MAC-адреса: 00:1A:2B:3C:4D:60 - 00:1A:2B:3C:4D:64, уровень загрузки процессора (например): 20%, 30%, 25%, 40%, 35%.

Предобработка данных:

– все данные должны находиться в одном формате (например, IP-адреса и MAC-адреса в строковом формате);
– метрики должны быть нормализованы (например, уровень загрузки процессора) для удобства векторизации.

Векторизация данных.

Преобразование в векторы:

– маршрутизатор – вектор: 192.168.1.1, 00:1A:2B:3C:4D:5E, 1000, 1 (где 1 - это бинарное представление активного состояния);
– коммутатор – вектор: 192.168.1.2, 00:1A:2B:3C:4D:5F, 100, 1;
– клиенты – векторы:
- 192.168.1.3, 00:1A:2B:3C:4D:60, 20;
- 192.168.1.4, 00:1A:2B:3C:4D:61, 30;
- 192.168.1.5, 00:1A:2B:3C:4D:62, 25;
- 192.168.1.6, 00:1A:2B:3C:4D:63, 40;
- 192.168.1.7, 00:1A:2B:3C:4D:64, 35.

Хранение векторов.

Все векторы должны храниться в векторной базе данных (таблица 1).

Таблица 1 – Векторная база данных

ID	IP Address	MAC Address	Пропускная способность	Нагрузка на процессор
R1	192.168.1.1	00:1A:2B:3C:4D:5E	1000	1
S1	192.168.1.2	00:1A:2B:3C:4D:5F	100	1
C1	192.168.1.3	00:1A:2B:3C:4D:60	0	20
C2	192.168.1.4	00:1A:2B:3C:4D:61	0	30
C3	192.168.1.5	00:1A:2B:3C:4D:62	0	25
C4	192.168.1.6	00:1A:2B:3C:4D:63	0	40
C5	192.168.1.7	00:1A:2B:3C:4D:64	0	35

Индексация и анализ.

Необходимо создать индексы для быстрого поиска векторов по IP-адресам или MAC-адресам.

Используя методы машинного обучения для анализа загруженности сети, выявить аномалии или оптимизацию ресурсов.

Компьютерная сеть предприятия должна быть представлена в виде векторной базы данных, что обеспечивает эффективный анализ ее состояния и производительности. Эта структура позволяет быстро извлекать данные, проводить анализ и принимать обоснованные решения для оптимизации работы сети [11,12].

Преимущества векторных баз данных:

- векторные базы данных оптимизированы для выполнения операций с высокими размерами данных, что позволяет быстро обрабатывать запросы и анализировать большие объемы информации;
- векторизация данных позволяет более точно находить похожие объекты и аномалии, что особенно важно для анализа сетевой безопасности и производительности компьютерной сети предприятия;
- возможность хранения различных типов данных (текст, изображения, метрики) в векторном формате позволяет создавать более комплексные модели анализа [13];
- векторные базы данных легко интегрируются с алгоритмами машинного обучения, что позволяет автоматически обучать модели на основе исторических данных для прогнозирования и выявления аномалий.

Заключение.

Векторные базы данных представляют собой мощный инструмент для анализа компьютерных сетей предприятий, предлагая множество преимуществ и возможностей для интеграции в существующие системы. Их способность обрабатывать большие объемы данных и поддерживать современные методы машинного обучения делает их незаменимыми для повышения эффективности, безопасности и устойчивости сетевых

инфраструктур предприятий.

Индексация и анализ векторных данных являются ключевыми процессами, которые позволяют эффективно извлекать и обрабатывать информацию из векторных баз данных. Использование различных методов индексации и анализа помогает выявлять скрытые паттерны, оптимизировать производительность и улучшать безопасность компьютерных сетей. Это создает основу для принятия обоснованных решений и повышения эффективности управления сетевыми ресурсами предприятий.

Библиографический список.

1. John Doe, Jane Smith, "Vector Databases: A New Paradigm for Data Storage and Retrieval", 2021, Publisher: Tech Publishing, - ISBN: 978-3-16-148410-0.
2. Alan Turing, Ada Lovelace, "Machine Learning for Network Security: A Comprehensive Guide", 2020, Publisher: Cybersecurity Press, ISBN: 978-1-234-56789-7.
3. Жегу Х. Квантование продукта для поиска по ближайшему соседу / Х. Жегу, М. Дуз, К. Шмид // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011. – № 33 (1). – pp. 117-128.
4. Джонсон Дж., Дуз М., Джегу Х. Миллиардный поиск сходства с помощью графических процессоров. IEEE Transactions on Big Data, 7 (3) (2021), стр. 535-547.
5. Краска Т., Бойтель А., Чи Э.Х., Дин Дж., Полизотис Н. Аргументы в пользу изученных структур индексов. Материалы международной конференции по управлению данными 2018 года, ACM (2018), 10.1145/3183713.3196909
6. Ле К.В., Миколов Т. Распределенные представления предложений и документов. Материалы 31-й международной конференции по машинному обучению, ICML 2014, Пекин, Китай, 21-26 июня 2014 г., Материалы семинара и конференции JMLR, том 32 (2014), стр. 1188-1196. URL-адрес: <http://proceedings.mlr.press/v32/le14.html>
7. Retrieval-Augmented Generation для наукоемких задач NLP, 2023, стр.211-234.
8. Ларошель Х., Ранзато М., Хадселл Р., Балкан М., Лин Х. (ред.), том 33, Curran Associates, Inc. (2020), стр. 9459-9474, URL-адрес: https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2020/file/6b493230205f780e1bc26945df7481e5-Paper.pdf
9. Ли Ф. Модернизация баз данных в облачную эпоху: создание баз данных, которые работают как конструкторы Lego, Труды Фонда VLDB, 16 (12) (2023), стр. 4140-4151.

10. Мальков Ю.А., Яшунин Д.А. Эффективный и надежный приближенный поиск ближайшего соседа с использованием иерархических навигационных графов малых миров, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 42 (4) (2020), pp. 824-836.
11. Миколов Т., Чен К., Коррадо Г., Дин Дж. Эффективная оценка представлений слов в векторном пространстве, 2023, стр.435 – 442.
12. Бенджио Ю., Лекун Ю. (ред.), 1-я международная конференция по образовательным представлениям, ICLR 2013, Скоттсдейл, Аризона, США, 2–4 мая 2013 г., материалы семинара (2013 г.), Веб-сайт: <http://arxiv.org/abs/1301.3781>, Академия Google (2023).
13. Саху С., Пол Н., Шах А., Хорнбэк А., Чава С. Универсальная векторная база данных NFT: масштабируемая векторная база данных для сопоставления сходства NFT, (2023)

¹*Палаев Сергей Васильевич, канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой, spalaiev@yahoo.com, Россия, Севастополь, Черноморское высшее военноморское училище имени П.С. Нахимова*

²*Безуглый Николай Николаевич, канд. техн. наук, доц., доцент, mmbez58@mail.ru, Россия, Севастополь, Черноморское высшее военноморское училище имени П.С. Нахимова*

³*Черменева Ирина Петровна, старший преподаватель, stihiya-07@yandex.ru, Россия, Севастополь, Черноморское высшее военноморское училище имени П.С. Нахимова*

Palaev Sergey Vasilevich, Candidate of Technical Sciences, Docent, Head of Department, spalaiev@yahoo.com, Russia, Sevastopol, Black Sea Higher Naval School named after P.S. Nakhimov

Bezuhliy Nicolay Nicolaevich, Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor, mmbez58@mail.ru, Russia, Sevastopol, Black Sea Higher Naval School named after P.S. Nakhimov

Chermenewa Irina Petrovna, Senior Lecturer, stihiya-07@yandex.ru, Russia, Sevastopol, Black Sea Higher Naval School named after P.S. Nakhimov

АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ПОДСИСТЕМЫ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ УПРАВЛЕНИИ ПАРАМЕТРАМИ МИКРОКЛИМАТА В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ

Заморёнов И.М.¹, Моисеев Д.В.², Заморёнов М.В.³

RELIABILITY ASSESSMENT OF SENSING SYSTEMS IN AUTOMATED INDOOR CLIMATE CONTROL FOR INDUSTRIAL SPACES

Zamoryonov I.M.¹, Moiseev D.V.², Zamoryonov M.V.³

Аннотация. Построена марковская модель функционирования автоматической системы контроля микроклимата производственных помещений с учетом отказов датчиков температуры, влажности и загазованности. Составлена и решена система уравнений Колмогорова для нахождения финальных вероятностей пребывания системы в состоянии, которая позволяет определять процентное соотношение времени точного соответствия условий микроклимата производственных помещений требованиям СНиП.

Abstract. A Markov model of the functioning of an automatic microclimate control system for industrial premises has been constructed, taking into account failures of temperature, humidity, and gas sensors. A system of Kolmogorov equations has been formulated and solved to determine the final probabilities of the system being in various states, which allows for calculating the percentage of time the microclimate conditions in industrial premises precisely comply with the requirements of building codes and regulations (SNiP).

Ключевые слова. Марковская модель, микроклимат, датчики, надежность.

Keywords. Markov model, microclimate, sensors, reliability.

Введение.

Поддержание оптимального микроклимата в производственных помещениях является актуальной задачей, регламентируемой нормативными документами (СНиП 41-01-2003 «Отопление, вентиляция и кондиционирование» [1]). Эти требования направлены на обеспечение энергоэффективности, безопасности труда и стабильного качества продукции. Параметры микроклимата – температура, влажность и скорость воздухообмена – оказывают непосредственное влияние как на технологические процессы, так и на работоспособность персонала.

Современные автоматизированные системы контроля микроклимата призваны поддерживать эти параметры в заданных пределах, однако их эффективность существенно зависит от корректного учета термодинамических процессов. Традиционные эмпирические подходы к управлению часто не учитывают динамику тепло- и массообмена, что приводит к избыточному энергопотреблению (как отмечено в [2,3]).

Исследуются термодинамические процессы в автоматизированной системе контроля микроклимата производственных помещений, на основе математического моделирования [4...7] надежности элементов системы. Результаты позволят разработать рекомендации по совершенствованию алгоритмов управления, снижению энергозатрат и обеспечению стабильных условий в производственной среде.

Цель работы – построение аналитической модели функционирования автоматической системы контроля микроклимата производственных помещений с учетом отказов ее элементов.

Моделирование системы контроля. При моделировании полагаем, что все процессы в системе – марковские и будем использовать соответствующие методы [8...10]. Исходными данными для данной задачи являются интенсивности отказов и восстановлений серверов, составляющих исследуемую систему: λ_1 – интенсивность отказа 1-го датчика, датчика температуры; λ_2 – интенсивность отказа 2-го датчика, датчика влажности; λ_3 – интенсивность отказа 3-го датчика, датчика углекислого газа; μ_1 – восстановления системы при отказе одного датчика; μ_2 – восстановления системы при отказе двух датчика; μ_3 – восстановления системы при отказе трех датчика. Граф такой системы показан на Рис.1.

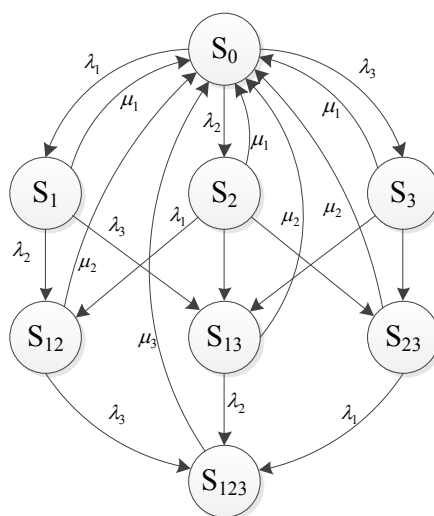


Рис. 1 – Граф автоматической системы контроля микроклимата производственных помещений

Опишем состояния системы: S_0 – состояние, в котором все датчики работают в штатном режиме. S_1 – состояние, соответствующее отказу 1-го датчика, датчика температуры. S_2 – состояние, соответствующее отказу 2-го датчика, датчика влажности. S_3 – состояние, соответствующее отказу 3-го датчика, датчика углекислого газа. S_{12} – состояние, соответствующее отказу 1-го и 2-го датчиков. S_{13} – состояние, соответствующее отказу 1-го и 3-го датчиков. S_{23} – состояние, соответствующее отказу 2-го и 3-го датчиков. S_{123} – состояние, в котором отказали все датчики, система не работает. Система дифференциальных уравнений Колмогорова [11] для поиска вероятностей состояний системы, представленной на Рис.1, имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_0}{dt} = (P_1 + P_2 + P_3)\mu_1 + (P_{12} + P_{13} + P_{23})\mu_2 + P_{123}\mu_3 - P_0(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3); \\ \frac{dP_1}{dt} = P_0\lambda_1 - P_1(\mu_1 + \lambda_2 + \lambda_3); \quad \frac{dP_2}{dt} = P_0\lambda_2 - P_2(\mu_2 + \lambda_1 + \lambda_3); \\ \frac{dP_3}{dt} = P_0\lambda_3 - P_3(\mu_3 + \lambda_1 + \lambda_2); \quad \frac{dP_{12}}{dt} = P_1\lambda_2 + P_2\lambda_1 - P_{12}(\mu_2 + \lambda_3); \\ \frac{dP_{13}}{dt} = P_1\lambda_3 + P_3\lambda_1 - P_{13}(\mu_2 + \lambda_2); \quad \frac{dP_{23}}{dt} = P_2\lambda_3 + P_3\lambda_2 - P_{23}(\mu_2 + \lambda_1); \\ \frac{dP_{123}}{dt} = P_{12}\lambda_3 + P_{13}\lambda_2 + P_{23}\lambda_1 - P_{123}\mu_3. \end{array} \right. \quad (1)$$

Для поиска финальных вероятностей необходимо в системе (1) приравнять левые части к нулю, так как время стремится к бесконечности.

Следует отметить, что теперь система состоит из однородных уравнений и для ее решения введем уравнение нормировки:

$$P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_{12} + P_{13} + P_{23} + P_{123} = 1. \quad (2)$$

Заменяя любое, наиболее громоздкое, уравнение на уравнение нормировки (2), получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_0 + P_1 + P_2 + P_3 + P_{12} + P_{13} + P_{23} + P_{123} = 1; \\ P_0\lambda_1 - P_1(\mu_1 + \lambda_2 + \lambda_3) = 0; \quad P_0\lambda_2 - P_2(\mu_2 + \lambda_1 + \lambda_3) = 0; \\ P_0\lambda_3 - P_3(\mu_3 + \lambda_1 + \lambda_2) = 0; \quad P_1\lambda_2 + P_2\lambda_1 - P_{12}(\mu_2 + \lambda_3) = 0; \\ P_1\lambda_3 + P_3\lambda_1 - P_{13}(\mu_2 + \lambda_2) = 0; \quad P_2\lambda_3 + P_3\lambda_2 - P_{23}(\mu_2 + \lambda_1) = 0; \\ P_{12}\lambda_3 + P_{13}\lambda_2 + P_{23}\lambda_1 - P_{123}\mu_3 = 0. \end{array} \right.$$

Система уравнений относится к классу алгебраических, что обеспечивает принципиальную разрешимость задачи. Детали численного решения опущены.

Исходными данными для моделирования являются интенсивности переходов между состояниями на графе, то есть интенсивности отказов и восстановлений (замены) датчиков. Пусть они будут равны:

$$\lambda_1 = 2 \text{ месяц}^{-1}; \lambda_2 = 1 \text{ месяц}^{-1}; \lambda_3 = 5 \text{ месяц}^{-1}; \\ \mu_1 = 100 \text{ месяц}^{-1}; \mu_2 = 100 \text{ месяц}^{-1}; \mu_3 = 100 \text{ месяц}^{-1}.$$

Тогда финальные вероятности исследуемой системы получаются следующие:

$$P_0 = 0.926; P_1 = 0.0176; P_2 = 0.0088; P_3 = 0.0446; \\ P_{12} = 0.0003; P_{13} = 0.0018; P_{23} = 0.00085; P_{123} = 0.00005.$$

Выводы.

Указанные вероятности свидетельствуют, что для принятых исходных данных вероятность полного отказа системы (отсутствия контроля за микроклиматом) составит $P_{123} \approx 0.00005 = 0.005\%$.

Полученные результаты позволяют определить финальные вероятности состояний, в которых нам известно количество действующих и ремонтируемых (заменяемых) датчиков, для выявления свойств термодинамических процессов, протекающих в производственных помещениях неконтролируемо. Планируется провести исследования по оптимизации работы автоматической системы контроля микроклимата производственных помещений.

Библиографический список.

1. СП 60.13330.2020. Свод правил. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. СНиП 41-01-2003: утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 30 декабря 2020 г. № 921/пр: введен 01.07.2021. – Москва, 2020. – 116 с.
2. СП 60.13330.2016. Свод правил. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. СНиП 41-01-2003: утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 16 декабря 2016 ш. № 968/пр: введен 17.06.2016. – Москва, 2017. – 73 с.
3. СанПиН 2.2.4.548-96. 2.2.4. Физические факторы производственной среды. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений: утвержден постановлением Госкомсанэпиднадзора России

от 01.10.1996 № 21: введен 01.10.1996. – 12 с.

4. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман. – М.: Высшее образование: Юрайт, 2009. – 479 с.
5. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения / В. Феллер. – М.: Мир, 1984. – 528 с.
6. Вентцель Е.С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Академия, 2003. – 429 с.
7. Кирпичников А.П. Методы прикладной теории массового обслуживания / А.П. Кирпичников. – Казань: Казанский гос. ун-т., 2011. – 199 с.
8. Кемени Дж. Конечные цепи Маркова / Дж. Кемени, Дж. Снелл. – М.: Наука, 1970. – 272 с.
9. Гнеденко Б.В. Введение в теорию массового обслуживания / Б.В. Гнеденко, И.Н. Коваленко. – М.: ЛКИ, 2012. – 400 с.
10. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания / Л. Клейнрок. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.
11. Колмогоров А.Н. Основные понятия теории вероятностей / А.Н. Колмогоров. – М.: Наука, 1974. – 120 с.

¹Заморёнов Илья Михайлович, ассистент,
ilia.zamoryonov@gmail.com, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО
«Севастопольский государственный университет»

²Моисеев Дмитрий Владимирович, д-р техн. наук, доц., зав.
кафедрой, dvmoiseev@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО
«Севастопольский государственный университет»

³Заморёнов Михаил Вадимович, канд. техн. наук, доц., доцент,
zamoryonoff@gmail.com, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО
«Севастопольский государственный университет»

*Zamoryonov Ilya Mikhailovich, Assistant, ilia.zamoryonov@gmail.com,
Russia, Sevastopol, Sevastopol State University*

*Moiseev Dmitry Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Docent,
Head of Department, dvmoiseev@mail.sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol
State University*

*Zamoryonov Mikhail Vadimovich, Candidate of Technical Sciences,
Docent, Associate Professor, zamoryonoff@gmail.com, Russia, Sevastopol,
Sevastopol State University*

УПРАВЛЕНИЕ ТУРБОДЕТАНДЕРОМ: СРАВНЕНИЕ ТРАДИЦИОННОГО PID-РЕГУЛИРОВАНИЯ И МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Молчанов Д.В.¹

TURBO EXPANDER CONTROL: A COMPARISON OF TRADITIONAL PID CONTROL AND MACHINE LEARNING MODELS

Molchanov D.V.¹

Аннотация. Исследуется управление турбодетандером с целью повышения его эффективности при снижении давления газа. Сравниваются два подхода: классический PID-регулятор и управление на основе многослойного персептрона (MLP). Анализ проводится в контексте работы турбодетандера как части системы подогревателя газа, с учётом точности регулирования давления, времени отклика и устойчивости к изменению входных параметров. Разработана математическая модель системы, выполнены численные эксперименты в стационарных и динамических режимах. Результаты показывают, что PID-регулятор надёжен в стабильных условиях, но плохо адаптируется к изменениям, вызывая колебания. В свою очередь, модель MLP обеспечивает более высокую точность, быстрый отклик и лучшую адаптацию к изменяющимся условиям. Сделан вывод о преимуществе MLP для управления турбодетандером в динамических режимах. Полученные данные могут быть использованы при создании более эффективных систем управления.

Abstract. The article studies the control of a turboexpander using a sensor measuring its efficiency when gas pressure decreases. Two connections are compared: a classic PID controller and control based on a multilayer perceptron (MLP). The analysis is carried out in the fifth work of a turboexpander as a part of a gas heater system, taking into account the accuracy of pressure control, response time and stability to determine the input parameters. A mathematical model of the system is developed, conducting numerical experiments in stationary and moving modes. The results show that the PID controller is reliable in stable conditions, but poorly adapts to changes that cause oscillations. In turn, the MLP model provides higher accuracy, fast response and fast adaptation to changing conditions. A conclusion is made about the advantages of MLP for controlling a turboexpander in moving modes. The data obtained can be used to create more efficient control systems.

Ключевые слова. Турбодетандер, PID-регулятор, машинное обучение, многослойный персептрон, управление давлением, численные эксперименты,

адаптивное управление, колебания, перерегулирование, время отклика.

Keywords. *Turboexpander, PID controller, machine learning, multilayer perceptron, pressure control, numerical experiments, adaptive control, oscillations, overshoot, response time.*

Введение.

Современные системы управления энергетическими установками требуют высокой точности, эффективности и адаптивности для обеспечения стабильной работы в условиях динамически изменяющихся параметров. Одной из ключевых задач таких систем является управление подачей газа на горелку в подогревателях транспортируемого газа. Традиционно для этой цели используются регуляторы давления, которые выполняют функцию снижения магистрального давления до требуемого уровня. Однако такие устройства имеют ряд существенных ограничений: они характеризуются низкой энергоэффективностью, так как избыточная энергия при снижении давления теряется в виде тепла, а также ограниченной адаптивностью к изменяющимся условиям эксплуатации.

Основная идея предлагаемого исследования заключается в замене традиционного регулятора давления на турбодетандер, принцип работы которого подробно описан в [1...6]. Турбодетандер представляет собой устройство, которое не только снижает давление газа, но и преобразует выделяющуюся при этом механическую энергию в электрическую. Это позволяет решить две важные задачи одновременно.

Первая задача заключается в понижении магистрального давления газопровода до требуемого уровня для подачи газа на горелку. Это обеспечивает стабильную работу подогревателя и предотвращает перегрузки системы. Вторая задача – использование механической энергии, выделяемой при расширении газа, для генерации электроэнергии. Полученная электроэнергия может быть направлена на обеспечение бесперебойного электроснабжения всех контрольно-измерительных приборов, что повышает автономность и надежность системы в целом.

Целью данной статьи является поиск наиболее эффективного решения для управления турбодетандером. Для достижения этой цели рассматриваются два подхода:

1. Классический PID-регулятор, который широко применяется в промышленности благодаря своей простоте, надежности и способности обеспечивать стабильное управление в линейных системах.

2. PID-регулятор с адаптивной системой управления на базе методов машинного обучения, которая позволяет учитывать сложные нелинейные зависимости и адаптироваться к изменяющимся условиям работы системы.

Выбор оптимального метода управления турбодетандером имеет большое значение, так как от этого зависит не только точность регулирования давления газа, но и эффективность преобразования энергии.

В статье проводится сравнительный анализ обоих подходов, а также обсуждаются их преимущества и недостатки в контексте практического применения.

Модели и методы.

Для выявления наиболее эффективного решения управления турбодетандером был разработан комплексный подход, включающий математическое моделирование, анализ влияния различных методов управления на вырабатываемую электрическую мощность, проведение численных экспериментов и сравнительный анализ. Методология исследования состоит из нескольких этапов: описание объекта исследования, выбор методов управления, создание математической модели системы, проведение численных экспериментов и расчет электрической мощности.

1. Описание объекта исследования.

Объектом исследования является турбодетандер, применяемый для снижения давления газа и преобразования избыточной энергии в электрическую. Турбодетандер рассматривается как часть системы подогревателя газа, где необходимо обеспечить:

- снижение магистрального давления газа до требуемого уровня для работы горелки;
- генерацию электроэнергии за счет механической энергии, выделяемой при расширении газа.

Основные параметры системы приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Параметры системы

Параметр	Значение
Давление газа на входе	от 5,4 до 10МПа
Давления газа на выходе(горелку)	От 0,01 до 0,07 МПа
Номинальный расход газа на горелку, не более	320 нм ³ /ч
Температура на входе	От -20 до 0°С
Температура после редуцирования	От -70 до -20 °С
Диаметр трубопровода	50мм

2. Выбор методов управления.

Для управления турбодетандером были рассмотрены два основных подхода: классический PID-регулятор и PID-регулятор с адаптивной системой на базе многослойного персептрона (MLP).

Классический пропорционально-интегрально-дифференциальный (PID) регулятор является одним из наиболее распространенных методов управления в инженерной практике благодаря своей простоте и надежности. Он работает по следующей формуле:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt},$$

где $u(t)$ – управляющее воздействие; $e(t)$ – ошибка между заданным значением и текущим выходом системы; K_p , K_i , K_d – коэффициенты пропорционального, интегрального и дифференциального компонентов.

Данный метод был использован и проанализирован в работах [7...14], где он хорошо зарекомендовал себя, но также оказался недостаточно эффективным в условиях изменяющихся параметров системы. Основные ограничения классического PID-регулятора включают: фиксированные коэффициенты, чувствительность к шумам и возмущениям, ограниченная адаптивность.

Адаптивный подход использует многослойный персептрон (MLP) для корректировки коэффициентов K_p , K_i , K_d в реальном времени. Этот метод позволяет учитывать текущие условия работы системы и минимизировать ошибки регулирования.

Типовая структурная схема регулирования ПИД-регулятором и нейронной сетью в качестве блока автонастройки представлен на Рис.1, детально разобрана в работах [15...20].

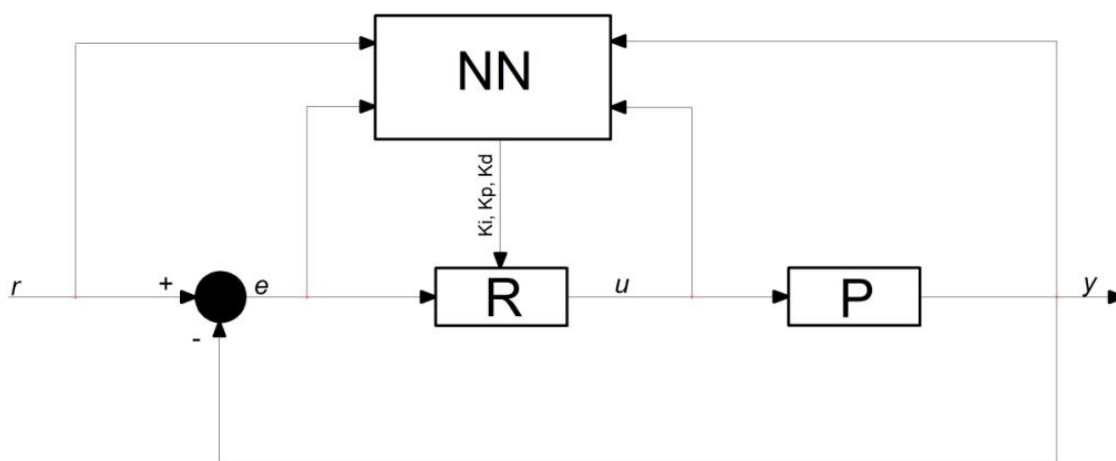


Рис.1 – Структурная схема регулирования ПИД-регулятором и нейронной сетью: NN – блок автонастройки с нейронной сетью, R – регулятор, P – управляемый объект, r – заданное значение, y – текущий выход, e – обратная связь, u – управляющее воздействие

Архитектура нейронной сети управления турбодетандером представлена на Рис.2.

Данная архитектура нейронной сети предназначена для управления параметрами, влияющими на работу турбодетандера. Входные данные включают давление на входе, температуру на входе, расход газа и ошибку регулирования. Эти данные передаются через несколько скрытых слоёв, состоящих из множества нейронов, которые обрабатывают информацию и формируют выходные сигналы. Выходной слой генерирует управляющие коэффициенты (пропорциональности, интегрирования и дифференциации), которые используются для управления системой, обеспечивая её

оптимальную работу.

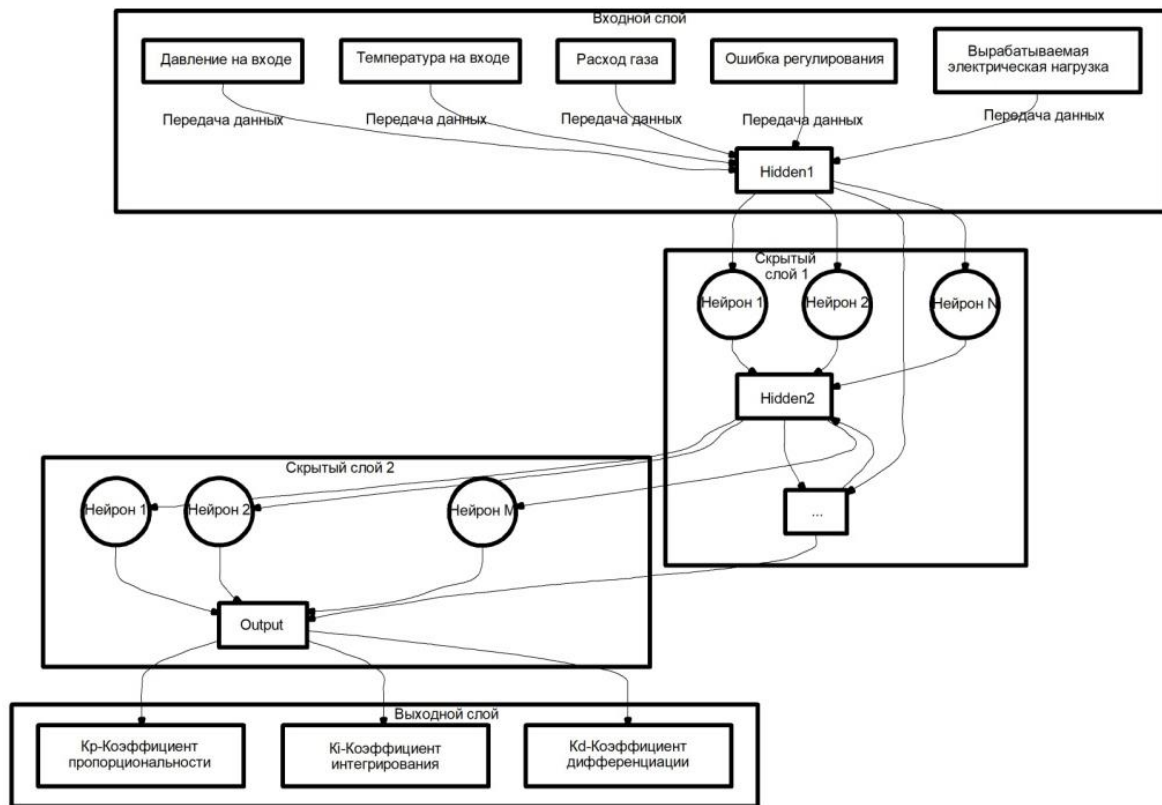


Рис.2 – Архитектура нейронной сети

3. Создание математической модели системы.

Математическая модель описывает физические процессы в турбодетандере и учитывает динамику изменения давления, температуры, расхода газа и вырабатываемой электрической мощности. Модель универсальна и применима как для классического PID-регулятора, так и для PID-регулятора с нейронной сетью (MLP)

Основные уравнения модели:

– уравнение состояния идеального газа

$$P = \rho RT,$$

где P – давление, ρ – плотность газа, R – удельная газовая постоянная, T – температура;

– адиабатический процесс расширения (связь между температурой и давлением)

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}},$$

где T_2 – температура на выходе газа, T_1 – температура на входе, P_1 – давление на входе, P_2 – давление на выходе, γ – показатель адиабаты;

– изменение удельной энтальпии

$$\Delta h = c_p (T_1 - T_2),$$

где c_p – удельная теплоемкость газа при постоянном давлении;

– вырабатываемая электрическая мощность

$$P_{el} = n_g \cdot n_t \cdot m \cdot \Delta h,$$

где n_g – КПД генератора, n_t – КПД турбодетандера, m – массовый расход, Δh – изменение удельной энтальпии;

– потери давления

$$\Delta P_{loss} = C \cdot m \cdot v^2,$$

где C – коэффициент потерь, v – скорость вращения колеса турбодетандера.

Результаты.

Численные эксперименты проводились для сравнения двух подходов к управлению турбодетандером: классического PID-регулятора и PID-регулятора с адаптивной системой на базе многослойного персептрона (MLP). Результаты моделирования представлены на Рис.3,4.

Эксперимент, представленный на Рис.3, демонстрирует динамику изменения давления при использовании двух различных подходов к управлению турбодетандером.

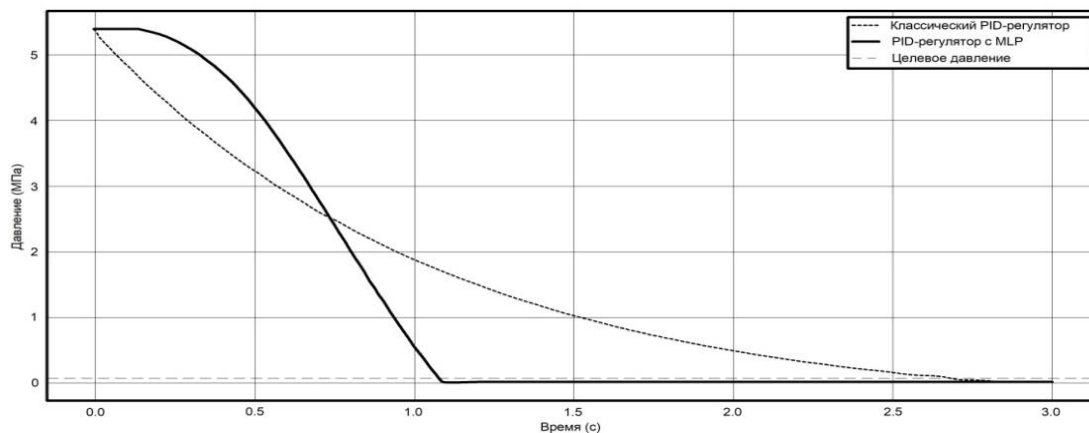


Рис.3 – Динамика переходных процессов

Первый подход – классический PID-регулятор, показанный черным пунктиром, характеризуется плавным снижением входного давления до заданного уровня. Процесс регулирования занимает около 3 секунд, что указывает на относительно медленную реакцию системы на изменение параметров. Однако такая плавность может быть полезна в условиях, где требуется минимизация резких скачков давления. Второй подход – регулятор с адаптивной системой управления на основе многослойного персептрона (MLP), представленный черной линией, демонстрирует более быстрое и точное достижение целевого значения давления. Благодаря способности MLP корректировать свои параметры в реальном времени,

регулятор достигает заданного уровня давления за 1,1 секунды, что значительно улучшает временные характеристики системы и делает её более эффективной при работе в динамических условиях.

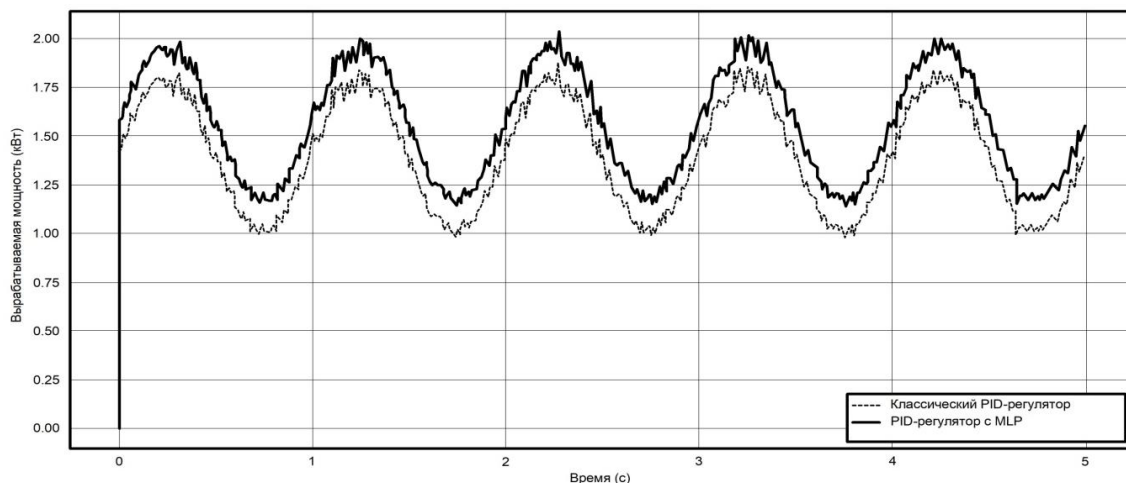


Рис.4 – Зависимость мощности от типа регулирования

На Рис.4 проиллюстрирована зависимость вырабатываемой электрической энергии от расхода газа на горелку для обоих типов регуляторов. Классический PID-регулятор, обозначенный черной пунктирной линией, показывает менее стабильные результаты, особенно при изменении расхода газа. Это связано с ограниченной адаптивностью классического регулятора, который не может быстро подстраиваться под изменяющиеся условия. В свою очередь, регулятор с адаптивной системой управления на базе MLP, показанный черной линией, демонстрирует значительное преимущество. Он оперативно корректирует свои параметры в зависимости от текущего расхода газа, что позволяет поддерживать оптимальный уровень выработки электроэнергии. Таким образом, регулятор с MLP обеспечивает не только более высокую точность регулирования давления, но и лучшую энергоэффективность системы, что особенно важно для повышения автономности и надежности работы турбодетандера.

Проведенное исследование показало, что управление турбодетандером с использованием классического PID-регулятора и регулятора на основе многослойного персептрона (MLP) имеет существенные различия в эффективности, особенно в условиях динамически изменяющихся параметров системы. Классический PID-регулятор демонстрирует высокую надежность в стационарных условиях, но его основным ограничением является низкая адаптивность к изменениям входных параметров. Это приводит к колебаниям давления и перерегулированию, что особенно заметно при скачкообразных изменениях давления или расхода газа. Время установления системы для классического PID-регулятора составляет около 3 секунд, что значительно

больше по сравнению с регулятором на основе MLP. Эти результаты согласуются с данными из литературы [21...22], где также отмечается чувствительность классического PID-регулятора к шумам и внешним возмущениям.

В свою очередь, регулятор с MLP обеспечивает более высокую точность регулирования давления и меньшее время отклика системы. Благодаря способности нейронной сети корректировать коэффициенты K_i , K_p , K_d в реальном времени, система достигает заданного уровня давления за 1,1 секунды, что значительно улучшает ее динамические характеристики. Кроме того, регулятор с MLP демонстрирует меньшие колебания давления и мощности, что указывает на его устойчивость к внешним возмущениям. Эти преимущества подтверждаются исследованиями [23...25], где методы машинного обучения успешно применялись для управления нелинейными системами.

Однако стоит отметить, что внедрение адаптивных систем управления требует дополнительных вычислительных ресурсов и сложной настройки нейронной сети. Это может быть ограничением для применения таких систем в условиях ограниченных ресурсов или при необходимости быстрого развертывания системы. В то же время классический PID-регулятор остается простым и надежным решением для линейных систем с минимальными изменениями параметров.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием математической модели, учитывающей основные физические процессы в турбодетандере, такие как адиабатический процесс расширения газа, изменение удельной энтальпии и потери давления. Модель была проверена на соответствие реальным физическим параметрам и показала хорошую сходимость с экспериментальными данными. Численные эксперименты проводились в широком диапазоне входных параметров (давление, температура, расход газа), что обеспечивает репрезентативность результатов.

Полученные результаты вносят вклад в развитие методов управления энергетическими установками, особенно в контексте повышения адаптивности и энергоэффективности систем. Предложенная модель на основе MLP может быть использована для разработки систем управления не только турбодетандерами, но и другими устройствами, работающими в условиях динамически изменяющихся параметров. Это открывает новые возможности для применения методов машинного обучения в промышленности и энергетике. Таким образом, выбор метода управления зависит от конкретных условий эксплуатации системы: для стационарных условий с минимальными изменениями параметров можно использовать классический PID-регулятор, тогда как для динамических условий предпочтительнее применять адаптивные системы на основе MLP.

Заключение.

Проведенное исследование позволило сравнить два подхода к управлению турбодетандером: классический PID-регулятор и регулятор с адаптивной системой на основе многослойного персептрона (MLP). Результаты подтвердили, что выбор метода управления оказывает существенное влияние на точность регулирования давления, время отклика системы и устойчивость к изменениям входных условий.

Классический PID-регулятор показал высокую надежность в стационарных условиях, однако его ограниченная адаптивность приводит к колебаниям и перерегулированию при изменении параметров системы. Это делает его менее эффективным для работы в динамических условиях, где требуется быстрая реакция на внешние возмущения. Модель на основе MLP продемонстрировала значительные преимущества, обеспечивая более высокую точность регулирования, меньшее время отклика и лучшую адаптацию к изменяющимся условиям. Эти характеристики особенно важны для систем, работающих в условиях непрерывных флуктуаций параметров.

На основании проведенного анализа можно заключить, что использование адаптивной системы управления на базе MLP более предпочтительно для управления турбодетандером в современных условиях эксплуатации. Такой подход позволяет не только повысить точность регулирования давления, но и увеличить эффективность преобразования энергии, что способствует повышению общей производительности системы.

Результаты исследования могут быть использованы для разработки новых систем управления, обеспечивающих стабильную и эффективную работу турбодетандера. Это открывает новые возможности для применения методов машинного обучения в энергетике и других отраслях промышленности, где требуется высокая точность и адаптивность управления. Внедрение адаптивных систем на основе MLP представляет собой перспективное направление для повышения автономности, надежности и энергоэффективности технологических процессов.

Библиографический список.

1. Багаутдинов И.З. Особенности применения и работы турбодетандеров / И.З. Багаутдинов, Н.Е. Кувшинов // Инновационная наука, 2016. – № 3-3. – С. 29-31.
2. Садыков Р.А. Применение турбодетандера в паросиловых установках для утилизации тепловой энергии в системах теплоснабжения / Р.А. Садыков, А.З. Даминов, И.Н. Соломин, В.А. Футин // Теплоэнергетика. – 2016. – № 5. – С. 56-62.
3. Kologrivov M. Development of the system of energy and resource saving during the operation of the gas pumping unit / M. Kologrivov, V. Buzovskyi //

- Technology Audit and Production Reserves. – 2021. – Vol. 5, No. 1(61). – P. 18-24.
4. Karimov A. Use of gas reduction energy at a gas distribution station / A. Karimov, R. Farukhshina // Liquid and Gaseous Energy Resources. – 2022. – Vol. 2, No. 1. – P. 15-19.
 5. Гизатуллина Д.М. применение турбодетандеров / Д.М. Гизатуллина // Аллея науки. – 2018. – Т. 5, № 11(27). – С. 391-395.
 6. Молчанова Р.А. Оценка потенциала тепловых вторичных энергоресурсов газотранспортной системы / Р.А. Молчанова, А.Р. Гатауллина // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2015. – № 2. – С. 22-26.
 7. Гревцов В.О. Алгоритм настройки ПИД-регулятора для целей образовательной робототехники / В.О. Гревцов, А.В. Уразбахтин, Д.Е. Баннов // Энергетические и электротехнические системы: международный сборник научных трудов / Под ред. С.И. Лукьянова, Н.В. Швидченко. Том Выпуск 2. Магнитогорск : Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. – 2015. – С. 300-304.
 8. Голдинова К.А. Сравнительный анализ методов подбора параметров ПИД-регулятора / К.А. Голдинова // Молодежный научно-технический вестник. – 2016. – № 5. – С. 8.
 9. Матяшов Д.В. Синтез ПИД-регулятора для корректирования показателей качества линейной непрерывной системы автоматического управления / Д.В. Матяшов // Colloquium-Journal. – 2019. – № 25-1(49). – С. 11-16.
 10. Лю Ф. Сравнительный анализ методов настройки ПИД-регуляторов / Ф. Лю // Научные исследования. – 2018. – № 4(23). – С. 23-26.
 11. Kulakov G.T. Compare of Transient Quality in Automatic Control Systems with Classic PID Algorithm and Optimal Regulator / G.T. Kulakov, K.I. Artsiomenka // Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations. – 2019. – Vol. 62, No. 2. – P. 192-200.
 12. Jiang H. Overview and development of PID control / H. Jiang // Applied and Computational Engineering. – 2024. – Vol. 66, No. 1. – P. 187-191.
 13. Espinel Blanco E. PID Control System Applied to a Hybrid Electric Power Generation System with Hydrogen / Blanco E. Espinel, Garcia G. Romero, Solano E. Florez // International Review of Automatic Control. – 2020. – Vol. 13, No. 4. – P. 182.
 14. Жилов Р.А. Постройка ПИД-регулятора с использованием нейронных сетей / Р.А. Жилов // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2022. – № 5(109). – С. 38-47.
 15. Белов М.П. Синтез ПИД-регулятора с нейронной сетью для нелинейного электропривода экзоскелетона / М.П. Белов, Д.Д. Чыонг, Д. Коач // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. – 2021. – Т. 1. – С. 74-77.
 16. Kaul S. Comparative Analysis and Controller Design for BLDC Motor Using PID and Adaptive PID Controller / S. Kaul, N. Tiwari, Sh. Yadav, A. Kumar //

- Recent Advances in Electrical and Electronic Engineering. –2021. – Vol. 14, No. 6. – P. 671-682.
17. Молчанов Д.В. Анализ эффективности применения нейронных сетей при реализации системы автоматического управления подогревателем газа / Д.В. Молчанов // Матрица научного познания. –2024. – № 11-1. – С. 97-103.
18. Феофилов Д.С. Сравнительный анализ нейросетевых и классических регуляторов на примере неустойчивого объекта / Д.С. Феофилов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 12. – С. 109-112.
19. Yang R. Fuzzy Neural Network PID Control Used in Individual Blade Control / R. Yang, Ya. Gao, H. Wang, X. Ni // Aerospace. – 2023. – Vol. 10, No. 7. – P. 623.
20. Nora K. Control of PID parameters by iterative learning based on neural network / K. Nora // Przegląd Elektrotechniczny. – 2021. – Vol. 1, No. 4. – P. 160-163.
21. Лисовал А.А. Влияние параметров настройки ПИД-регулятора скорости на расход топлива дизеля / А.А. Лисовал, А.В. Вербовский, В.В. Штрибец // Двигатели внутреннего сгорания. – 2017. – № 1. – С. 17-21.
22. Лысова А.А. Корректирование погрешностей динамических измерений на основе ПИД-регулирования / А.А. Лысова, С.В. Пашнин // Наукосфера. – 2025. – № 2-2. – С. 87-92
23. Ding Ya. X. Deep PID Neural Network Controller for Precise Temperature Control in Plastic Injection-moulding Heating System / Ya. X. Ding, S. Cheng, Yu. T. Huang, De. Yu. Hong // IFAC-PapersOnLine. – 2022. – Vol. 55, No. 27. – P. 114-119.
24. Старостина Я.К. Использование нейросетевых регуляторов в автоматизированных системах управления электроприводом / Я.К. Старостина, А.Д. Токарев, Д.Д. Поснов // Интеллектуальная электротехника. – 2024. – № 4(28). – С. 47-57.
25. Liu G. Neural network PID control of spherical permanent magnet based on external magnetic field driving system / G. Liu, R. Jiang, L. Fan // Journal of Physics: Conference Series. – 2024. – Vol. 2787, No. 1. – P. 012044.

¹Молчанов Дмитрий Вадимович, аспирант,
dmitry.molchanov@yandex.ru, Россия, Саратов, ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

Molchanov Dmitry Vadimovich, Postgraduate Student,
dmitry.molchanov@yandex.ru, Russia, Saratov, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

**АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ГЕТЕРОГЕННОЙ ИНТЕГРАЦИИ В
АВТОНОМНЫХ СТРУКТУРНО НЕСТАЦИОНАРНЫХ ГРУПП
БЕСПИЛОТНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Доронина Ю.В.¹, Луцишин Т.О.², Даниленко В.Е.³

**ALGORITHMIZATION OF HETEROGENEOUS INTEGRATION IN
AUTONOMOUS STRUCTURALLY UNSTABLE GROUPS OF
UNMANNED OBJECTS**

Doronina Yu.V.¹, Lutsishin T.O.², Danilenko V.E.³

Аннотация. Рассматривается алгоритмический подход к моделированию структурно нестационарных беспилотных групп объектов; определяются особенности структурной дифференциации автономных групп в рамках классификации видов стратегий их поведения. Предложены основные принципы выбора из ансамбля алгоритмов поведения автономной беспилотной группы объектов, что позволило реализовать ряд экспериментов по гетерогенной интеграции элементов таких групп. Реализована гибридная полимодель на основе инструментов Python и Matlab.

Abstract. An algorithmic approach to modeling structurally unstable unmanned groups of objects is considered; the features of the structural differentiation of autonomous groups within the framework of the classification of types of strategies of their behavior are determined. The basic principles of choosing from an ensemble of algorithms for the behavior of an autonomous unmanned group of objects are proposed, which made it possible to implement a number of experiments on the heterogeneous integration of elements of such groups. Implemented a hybrid poly model based on Python and Matlab tools.

Ключевые слова. Беспилотный объект, автономная группа, структурно нестационарная группа, алгоритмизация поведения.

Keywords. Unmanned object, autonomous group, structurally unstable group, algorithmization of behavior.

Создание систем искусственного интеллекта, поддерживающих практические задачи в области движения и взаимодействия автономных роботов являются на сегодняшний день особенно актуальными. Например, это относится к области коллективного поведения роя в различных средах

на отдалении от оператора (угольные шахты, подземные коммуникации, подводные исследования, военное дело и т.п.). В таких условиях однородная (гомогенная) группа беспилотных объектов (БО) будет относительно эффективной с точки зрения управления, то есть стратегия управления «каждый главный», с одной стороны проста в подготовке к решению задач, в другой стороны, – может повлечь возможный алгоритмический хаос или потребует больше ресурсов в каждом БО.

Для относительно простых алгоритмов взаимодействия в неоднородных (гетерогенных) группах весьма перспективны идеи классификации стратегий поведения и построения макро- и микро-субстратегий, то есть, когда общая стратегия всей группы БО зависит и определяется микро-субстратегиями каждого БО или, в более сложных случаях, – каждой подгруппы БО. Обсуждением этих идей и посвящены представленные статье исследования авторов.

Аспекты развития алгоритмической поддержки коллективного поведения в беспилотных группах и моделирования поведения в автономных группах широко представлены в ряде исследований. Например, в [1] рассматриваются идеи коллективного поведения роботов. В проекте используется математическое решение проблемы нахождения пути до целей. Речь идет об исследованиях в области теории систем, создании формальных моделей и механизмов коллективного поведения.

В [2] сформулировано понятие автономной миссии мобильных роботов, под которой понимается их скоординированное автономное поведение, направленное на достижение одной или нескольких командных целей, однако формального описания не приводится.

В ряде других источников рассматривались принципы построения гибридных команд: кооперативный [3,4], доверительный и другие [5,6]; многие аспекты моделей командной работы агентами, такие как коммуникационные протоколы для обеспечения взаимного понимания, командный мониторинг для оценки прогресса, формирование совместных целей, учет взаимозависимости задач в гибридной командной работе, все еще остаются неизученными.

В целом, развитие алгоритмической поддержки коллективного поведения в беспилотных группах представляет собой важную область исследования, направленную на улучшение координации и взаимодействия между автономными агентами. Ключевыми аспектами этой области являются:

1. Алгоритмы распределения задач.

Разделение задач среди агентов группы требует эффективных методов планирования и координации. Алгоритмы должны учитывать ресурсы каждого агента, их местоположение и цели миссии. Примеры: алгоритм распределенного планирования (DARP), алгоритм согласования целей (GAO) [5,6]. Работа [5] посвящена динамическим задачам подбора и доставки, которые включают в себя распределение задач и планирование маршрутов в реальном времени. Она описывает различные подходы к

решению подобных проблем, включая DARPA. Публикация [6] рассматривает применение метода большого окрестного поиска (Large Neighborhood Search, LNS) для решения динамических задач маршрутизации транспортных средств, что тесно связано с DARPA и другими подобными проблемами.

2. Координация движения.

Координирование перемещения БО внутри группы осуществляется для предотвращения столкновений и оптимизации маршрутов. Используются алгоритмы потенциального поля, согласованные траектории, децентрализованное управление.

3. Модели коллективного интеллекта.

Изучение моделей коллективного разума, где группа действует как единое целое, адаптируясь к изменениям окружающей среды, наиболее известные модели: Swarm Intelligence, Multi-Agent Reinforcement Learning (MARL). Например, в [7] особое внимание уделяется разработке и использованию алгоритмов, на основе природных феноменов, включая Particle Swarm Optimization (PSO) и Ant Colony Optimization (ACO), а также охватывается спектр областей применения Swarm Intelligence, начиная от оптимизации инженерных задач и заканчивая управлением роботизированными системами. В источнике [8] основное внимание уделено алгоритмам, таким как Particle Swarm Optimization (PSO) и Ant Colony Optimization (ACO) и их применению в решении различных задач оптимизации и реализации.

4. Коллективное принятие решений.

Коллективные решения требуют разработки механизмов консенсуса и голосования среди агентов. Используются: Байесовский подход, методы машинного обучения, вероятностное голосование. Например, в источнике [9] представлена модель агента для мониторинга и анализа динамики сложного человеческого поведения, включая аспекты коллективного принятия решений в смарт-средах. В [10] рассматриваются процессы коллективного принятия решений в распределённых средах, акцентируя внимание на аспектах безопасности и конфиденциальности. Эти аспекты охватывают широкий спектр вопросов, связанных с развитием алгоритмов для коллективного поведения беспилотных групп, в том числе в особых условиях функционирования [11,12].

Таким образом, развитие алгоритмов и методологического описания поведения групп БО представляется актуальным и является темой представленного исследования авторов.

Постановка задачи.

Рассматривается группа автономных беспилотных объектов (АБО), агенты которой реализуют определенные действия на координатной сетке. Под «поведением» БО (АБО) в работе понимается совокупность собственных передвижений (pAI) и взаимодействий с другими агентами ($A1vA2$: между агентами $A1$ и $A2$). Элементы поведения агента: pA , $A1vA2$ с учетом состояния покоя (ожидания) (oAI) составляют полное множество типов событий агента. Детализация классов событий, связанных с

агентами, в работе не рассматривается. Поведение АБО рассматривается на основе принципа варибельности базовых алгоритмов, который схематично изображен на Рис.1.

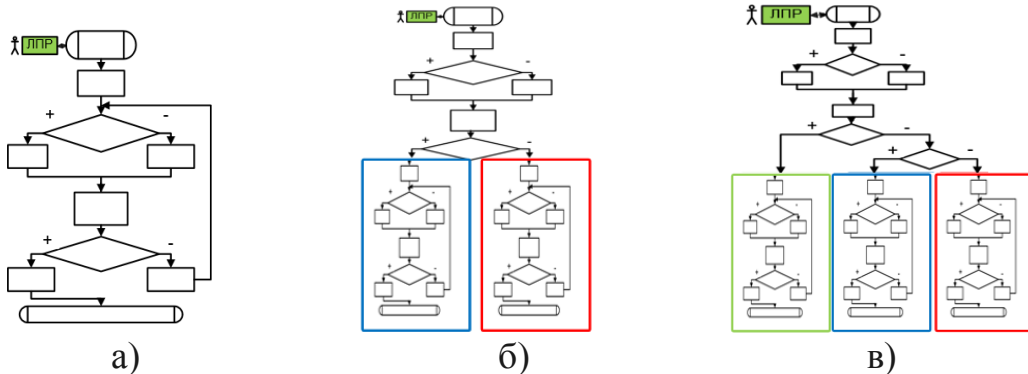


Рис.1 – Схемы принципа варибельности алгоритмов поведения АБО: а) базовый алгоритм; б) трансформация базового алгоритма на основе выбора из двух альтернативных алгоритмов; в) трансформация базового алгоритма на основе выбора из ансамбля алгоритмов

Приведенные на Рис.1. схемы принципа варибельности алгоритмов отражают особенности реализации поведения АБО на основе выбора из ансамбля алгоритмов и формирования отдельных сценариев после достижения некоторого события. Таким образом, ансамбль алгоритмов порождает множество возможных сценариев поведения АБО.

Введем следующие обозначения:

– r^i – ресурс i -го автономного беспилотного объекта (АБО), $r_{min}^i \leq r^i \leq r_{max}^i$, где r_{min}^i, r_{max}^i – соответственно возможный минимальный и максимальный объемы ресурсов i – го АБО;

– w_i – роль i -го АБО; $w_i \in W$, где W – множество всех возможных ролей группы АБО; в исследовании рассматриваются два типа ролей: «координатор», «исполнитель»; предполагается, что возможна передача роли от i к j АБО: $\widetilde{w}_i$;

– d_i – длина маршрута i -го АБО к заданной цели;

– $G(k, n)$ – некоторая группа АБО, k – номер группы, n – количество объектов в группе;

– z_i – цель i -го АБО; $z_i \in Z$, где Z – множество всех возможных целей АБО; в исследовании цель трактуется как достижение заданного положения (ячейки сети), либо максимально возможное приближение к заданной ячейке сети (в зависимости от стратегии);

– $Mk(G(k, n, s | \widetilde{w}_i), z_{Mk} | z_i)$ – миссия группы АБО, то есть общая цель группы при условии переменной роли i -го АБО, $w_i \in W$, s – класс стратегии, реализуемой группой АБО в текущей задаче, $s \in S$, где S – множество стратегий.

Ставится ряд задач:

1) $\min_{k,s,n}^z \sum_i^l (r^i), G(k, n) | z$, (минимизация общего ресурса АБГО

при достижении цели z);

2) $\min_{k,s,n}^z \sum_i^I (d^i), G(k, n) | z$, (минимизация общего маршрута АБГО при достижении цели z);

Применяя предложенные обозначения, возможна постановка и других задач, например, максимизация остаточного ресурса отдельного элемента группы или группы в целом (при мультизадачной миссии АБО):

3) $\min_{k,s,n}^z \sum_i^I (r^i), Mk (G(k, n, s | \widetilde{w}_i), z_{Mk} | z_i$.

В отличие от классического конечно-автоматного подхода, предложенные постановки позволяют формировать расширяемую библиотеку алгоритмов функционирования группы АБО.

Классификация видов стратегий автономных беспилотных групп объектов (АБГО).

С целью детализации алгоритмического описания поведения АБО, предложена иерархия классов стратегий АБГО.

Класс 1: однородная автономная группа, существует возможность перераспределения целей при достижении одним из АБО одной из локальных целей. Бесконечный ресурс, компьютерное зрение (знание конечной точки маршрута i -го АБО в начале миссии). Недостаток: расход ресурсов.

Класс2: однородная автономная группа, существует возможность перераспределения целей при достижении одним из АБО одной из локальных целей, наличие иерархии роботов – робот с наивысшей ролью должен достичь цель, что будет означать успех миссии, иначе – провал. Бесконечный ресурс, компьютерное зрение (знание конечной точки маршрута i -го АБО в начале миссии).

Класс3: однородная автономная группа, существует возможность перераспределения целей при достижении одним из АБО одной из локальных целей, наличие иерархии роботов – робот с наивысшей ролью должен достичь цель, что будет означать успех миссии, иначе – провал. Ограниченный ресурс, что ведет к передаче роли от главного к подчиненному при недостаточном ресурсе у первого, компьютерное зрение (знание конечной точки маршрута i -го АБО в начале миссии). Недостаток: необходимость передачи роли при большой удаленности цели.

На основе предложенной классификации, построим ряд алгоритмов, позволяющих учесть гетерогенную интеграцию в автономных беспилотных группах объектов.

Реализация алгоритмов гетерогенной интеграции в автономных беспилотных группах объектов.

Для моделирования работы беспилотной группы была разработана программа имитации поведения на основе системы алгоритмов построения маршрутов к заданным целям. Программа разработана на языке программирования Python версии 3.12 с использованием библиотеки PyQt5, использован паттерн проектирования MVC. Разработанный

программный продукт имеет следующие возможности и особенности:

- задание количества целей z , АБО;
- выбор заданной цели роботом, построение маршрута к ней; при пересечении траекторий робот перестраивает маршрут;
- механизм окружения цели по принципу (сначала горизонталь, вертикаль, только затем диагональ);
- автономное управление (принятие решений лежит на роботах, для отслеживания прогресса используется пошаговое управление);
- наличие ресурсов у роботов (доступное количество ходов);
- добавление ролей, а именно «координатор», «исполнитель»;
- приемник выбирается по 2 параметрам: расстояние до цели и его ресурс.

Механизм обработки цели: для каждой цели задается необходимое ей количество АБО (или процент необходимых ей роботов), как только ее окружает нужное количество, остальные роботы прекращают свое движение к ней и могут сменить цель, или при их отсутствии остаться в прежнем состоянии.

Использование ресурсов: за 1 ход АБО тратит 1 условную единицу ресурса (УЕР). На Рис.2,3 приведены результаты моделирования реализации задач группой АБО в миссии: две цели, 4 АБО, стратегия 1; миссия АБГО: $M1(G(1, 4, 1), z_{Mk}|z_i, z_j)$.

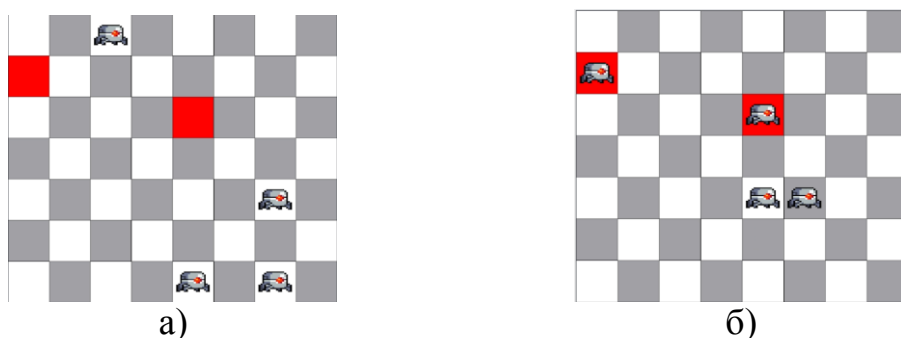


Рис.2 – Реализация алгоритма достижения целей (две цели, 4 беспилотных объекта) в случае одновременного достижения целей двумя БО:
а) начальное расположение БО; б) конечное расположение БО

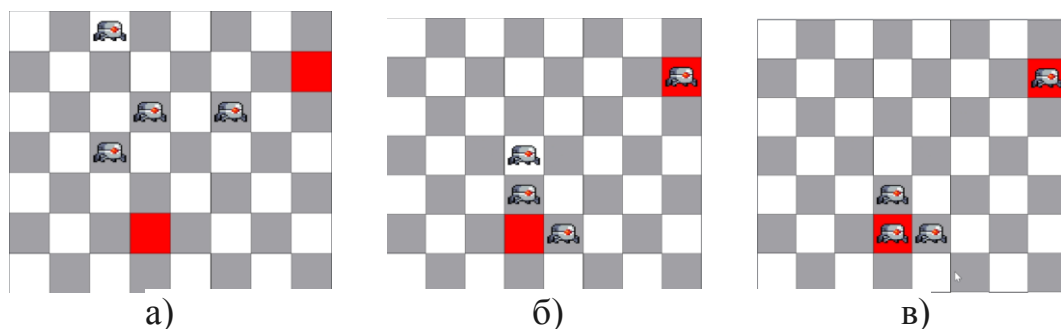


Рис.3 – Реализация алгоритма достижения целей (две цели, 4 беспилотных объекта) в случае неодновременного достижения целей двумя БО:
а) начальное расположение БО; б) частичное достижение целей БО;
в) конечное расположение БО

Наиболее интересным и перспективным с точки зрения

иллюстрирования поведения АБГО является класс 3. На Рис.4 приведены результаты моделирования реализации задач группой АБО в миссии: две цели, 4 АБО, стратегия 1; миссия АБГО: $M1(G(1, 4, 1), z_{Mk} | z_i, z_j)$.

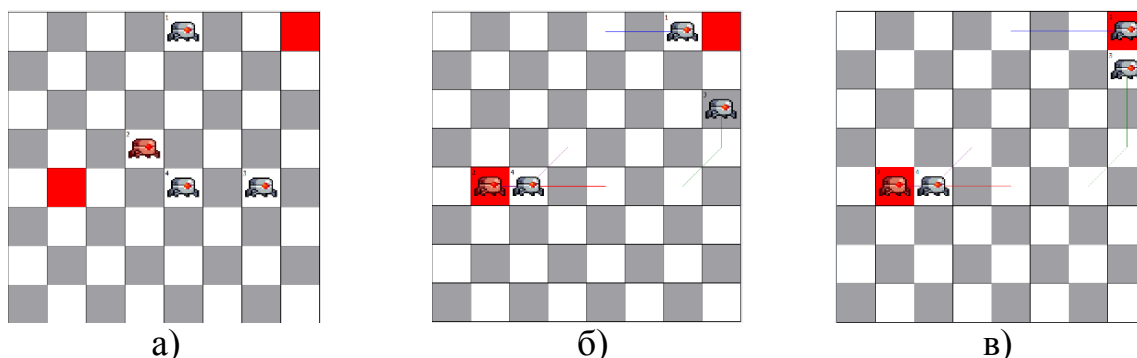


Рис.4 – Реализация алгоритма достижения целей с приоритетом ролей (две цели, 4 БО, робот-агент с особой ролью должен приоритетно достигнуть цели) в случае неодновременного достижения целей двумя БО:

- а) начальное расположения БО; б) частичное достижение целей БО;
в) конечное расположение БО

Приведенные на Рис.4 фиксации этапов поведения АБО отображают наличие одного робота-агента с особой ролью и две цели на начальном этапе случайной расстановки (Рис.4.а). Далее на Рис.4.б можно видеть, как робот-агент с особой ролью достиг ближайшей цели, а остальные БО приблизились к целям. На следующем этапе (Рис.4.в) БО достиг второй цели (верхняя правая клетка).

На Рис.5 приведены результаты моделирования реализации задач группой АБО в миссии: две цели, 4 АБО, стратегия 1; миссия АБГО: $M1(G(1, 4, 1), z_{Mk} | z_i, z_j)$, робот-агент с особой ролью должен достигнуть цели, если есть хоть один робот с достаточным ресурсом) в случае неодновременного достижения целей двумя БО.

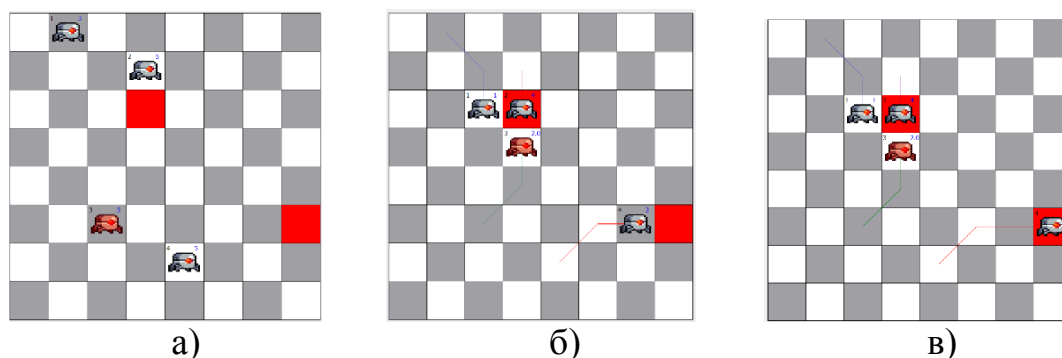


Рис.5 – Реализация алгоритма достижения целей с приоритетом ролей и ограниченным ресурсом: а) начальное расположения БО;
б) частичное достижение целей БО; в) конечное расположение БО

Приведенные на Рис.5 фиксации этапов поведения АБО отображают наличие одного робота-агента с особой ролью и две цели на начальном этапе случайной расстановки (Рис.5.а)), далее, на Рис.5.б), можно видеть, как робот-

агент с особой ролью приблизился к ближайшей цели (цель уже занята другим БО), но он не направится к другой цели в связи с ограниченным ресурсом и на следующем этапе, Рис.5.в) – БО достиг второй цели.

В таблице 1 приведены основные результаты моделирования работы АБГО по различным стратегиям на основе созданного программного продукта; основным параметром модели было выбрано число шагов, за которое миссия будет выполнена (все цели будут достигнуты) при условии случайного расположения БО.

В созданной версии программного продукта, реализуется весь ансамбль алгоритмов, поддерживающих задачи 1) и 2) в рамках миссий минимизации ресурса и минимизации маршрута, дальнейшее развитие работы предполагает комплексную реализацию задачи 3).

По всем приведенным результатам реализации предложенных алгоритмов можно видеть, что ожидаемые варианты достижения целей как отдельными объектами АБО, так и целой группой весьма разнообразны, что отражает алгоритмическую вариативность их миссий.

Таблица 1 – Результаты моделирования работы АБГО

№ эксперимента	Класс 1	Класс 2	Класс 3
1	4	4	4
2	3	2	3
3	4	4	5
4	3	3	3
5	3	5	4
6	4	4	5
7	3	3	5
Среднее	3,43	3,57	4,14

Дальнейшее развитие исследований реализовано в направлении гибридизации моделей и создание альтернативного кода с помощью инструмента Matlab, что позволило построить алгоритмизацию процесса для дальнейшего использования нейросетевых технологий обучения системы поддержки принятия решений для прогнозирования оптимальных маршрутов и требуемых ресурсов для достижения цели миссии.

На Рис.6 показаны результаты моделирования на основе кода, разработанного с помощью инструмента Matlab, для детального моделирования созданных алгоритмов. На поле отображены две точки, соответствующие БО и точка-цель; их маршруты изображаются в виде линий. Графики представляют расстояния до цели и изменение количества ресурсов, оставшихся у БО (Точка 1и Точка 2).

На Рис.6 показана две реализации процесса при разных начальных условиях: начальное распределение ресурсов у Т1 и Т2 одинаковое: 100 и 150 единиц соответственно; красный Т2 в двух случаях ближе к цели. На Рис.6.б показан случай, когда точка Т2 передала свои ресурсы Т1 (что видно на 5 шаге процесса на графике Количество ресурсов суммарным ростом столбца).

Таким образом, можно видеть, как построенная гибридная полимодель, состоящая из двух моделей на основе разных инструментов справилась с моделированием различных аспектов гетерогенной интеграции в автономных структурно нестационарных групп беспилотных объектов и при дальнейшем развитии позволит сформировать основу для системы поддержки принятия решений по прогнозированию поведения таких групп на искусственного интеллекта.

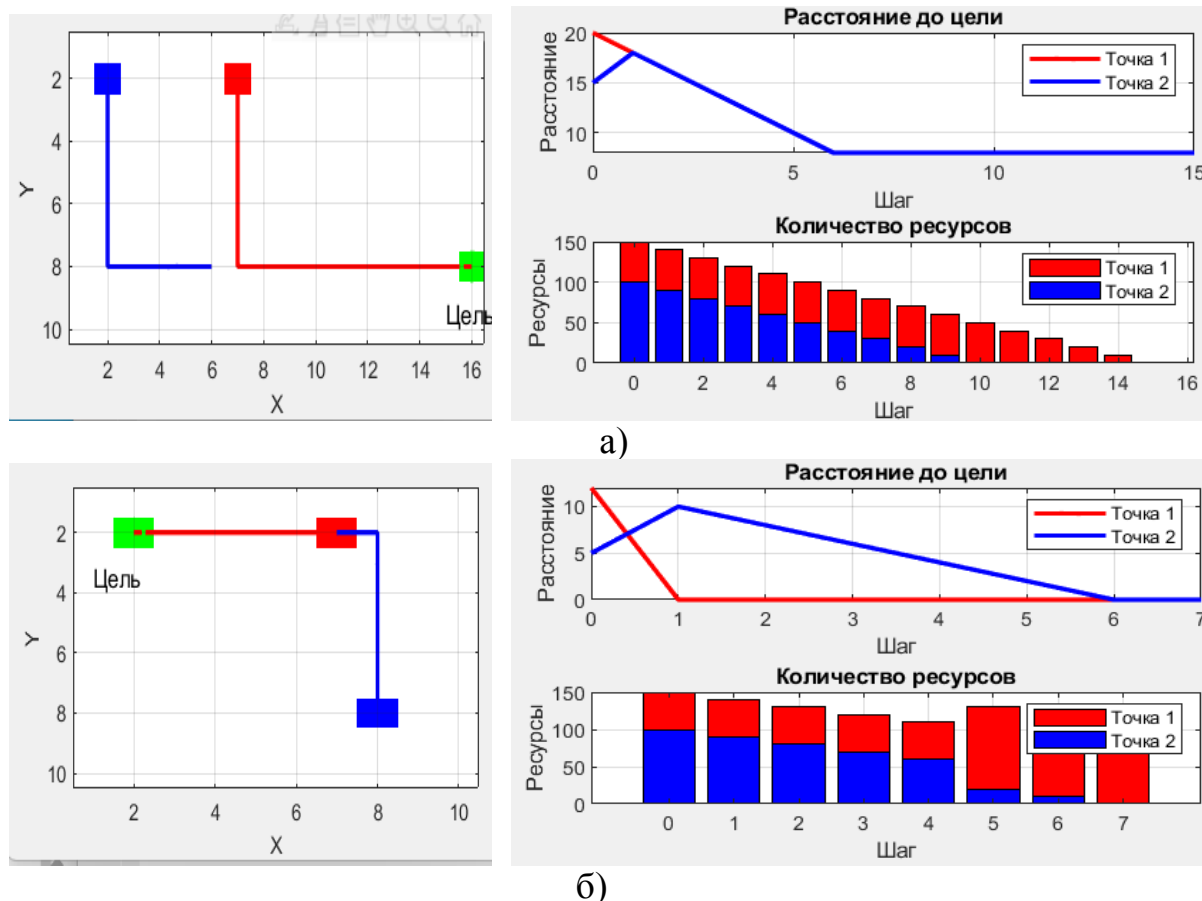


Рис.6 – Реализация алгоритма достижения целей с ограниченным ресурсом: а) промежуточное расположение БО; б) частичное достижение целей БО (достижение цели только одним из двух БО)

Библиографический список.

1. Варшавский В.И., Поспелов Д.А. Оркестр играет без дирижера: размышления об эволюции технических систем и управления ими / В.И. Варшавский, Д.А. Поспелов. – М. : Наука, 1984. – 208с.
2. Городецкий В.И. Управление коллективным поведением роботов в автономной миссии / В.И. Городецкий // Робототехника и техническая кибернетика. – 2016. – № 1(10). – С. 40-54.
3. Sycara K. Literature Review of Teamwork Models [Electronics resource] / K. Sycara, G. Sukthankar // CMU-RI-TR-06-50, November 2006. – Robotics Institute Carnegie Mellon University. – 2006 (дата обращения: 13.09.2024)

4. Stasser G., Stewart D., and Wittenbaum G. Expert roles and information exchange during discussion: the importance of knowing who knows what. *Journal of Experimental Social Psychology*, 31(1), 1995. (дата обращения: 13.09.2024)
5. Berbeglia, G., Cordeau, J.-F., & Laporte, G. (2010). Dynamic pickup and delivery problems. *European Journal of Operational Research*, 202(1), 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.04.028>
6. Mahrishi, M., Hentenryck, P. V., Bent, R., Langevin, A., & Rousseau, L.-M. (2009). Large neighborhood search for dynamic vehicle routing. In *Proceedings of the 21st International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'09)* (pp. 634–639). Morgan Kaufmann Publishers Inc.
7. Kennedy, J., Eberhart, R.C. (2001). *Swarm Intelligence*. Morgan Kaufmann Publishers. ISBN: 9781558605954.
8. Engelbrecht, A.P. (2005). *Fundamentals of Computational Swarm Intelligence*. John Wiley & Sons. ISBN: 047009729X.
9. Tibor Bosse, Mark Hoogendoorn, Michel C.A. Klein, Jan Treur. An Ambient Agent Model for Monitoring and Analysing Dynamics of Complex Human Behaviour. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, Vol. 3, No. 4, pp. 283-303, 2011.
10. Sushil Jajodia, Pierangela Samarati, Maria Luisa Damiani. Collaborative Decision Making in Distributed Environments. *ACM Computing Surveys*, Vol. 42, No. 3, Article 12, May 2010. DOI: 10.1145/1749603.1749606.
11. Павлов Е.В. Разработка методики обоснования тактико-технических требований к робототехническому комплексу многорежимного пожаротушения / Е.В. Павлов // Технологии гражданской безопасности. – Т. 17. – 2020. – № 2 (64). – С. 61-67.
12. Городецкий В.И. Управление коллективным поведением роботов в автономной миссии / В.И. Городецкий // Робототехника и техническая кибернетика. – 2016. – № 1(10). – С. 40-54.

¹*Доронина Юлия Валентиновна, д-р техн. наук, доц., профессор, YVDoronina@sevsu.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

²*Луцишин Татьяна Олеговна, студент, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

³*Даниленко Вадим Евгеньевич, студент, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

Doronina Yulia Valentinovna, Doctor of Technical Sciences, Docent, Professor, YVDoronina@sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Lutsishin Tatyana Olegovna, Student, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Danilenko Vadim Evgenievich, Student, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА КОНЦЕНТРАЦИЙ ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ БРЫЗГАЛЬНЫХ БАССЕЙНОВ ОТВЕТСТВЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ АЭС

Мороз В.А.¹, Моисеев Д.В.²

MATHEMATICAL MODEL FOR CALCULATING CONCENTRATIONS OF CHEMICALS IN SPLASH POOLS OF RESPONSIBLE CONSUMERS OF NUCLEAR POWER PLANTS

Moroz V.A.¹, Moiseev D.V.²

Аннотация. В статье рассматривается проблема моделирования сложных процессов, развивающихся в брызгальных бассейнах АЭС. Авторами теоретически обоснована структура усовершенствованного мониторинга качества воды систем оборотного водоснабжения на основе системного анализа техно-экосистемы АЭС с использованием методов математического моделирования. Обоснованы в рамках теоретической гидравлики системы уравнений в частных производных, отображающие законы сохранения массы воды (оборотной) и примесей. Получены с использованием численных методов решения уравнения динамики концентраций веществ примесей. Особенностью данного подхода является то, что при использовании развернутых во времени данных натурных измерений относительно концентраций контролируемых веществ автоматически реализуются такие существенные аспекты математической модели, как ее калибровка и верификация.

Abstract. The article discusses the problem of modeling complex processes developing in the catchment areas of nuclear power plants. The authors theoretically substantiate the structure of improved water quality monitoring in recycled water supply systems based on a systematic analysis of the techno-ecosystem of nuclear power plants using mathematical modeling methods. Systems of partial differential equations reflecting the laws of conservation of the mass of water (circulating) and impurities are substantiated within the framework of theoretical hydraulics. Obtained using numerical methods to solve the equation of dynamics of concentrations of impurity substances. A special feature of this approach is that when using field measurement data deployed over time relative to the concentrations of controlled substances, such essential aspects of the mathematical model as its calibration and verification are automatically implemented.

Ключевые слова. Математические модели потоков энергии, модели теплообмена, описания изменения температуры воды, водные экосистемы атомных станции.

***Keywords.** Mathematical models of energy flows, heat transfer models, descriptions of water temperature changes, and aquatic ecosystems of nuclear power plants.*

Введение. Согласно природоохранному законодательству РФ, проводится экологический мониторинг водных объектов на атомных станциях (АЭС) в требуемом объеме. Однако, совершенствование существующей системы мониторинга не вызывает сомнений, так как специалисты на АЭС выполняют только наблюдения, анализ и химический контроль поверхностных вод прилегающей акватории. Прогнозирование качества воды в зависимости от режимов эксплуатации систем технического водоснабжения (СТВ) не выполняется.

Актуальность работы заключается в разработке и применении специалистами АЭС математической модели расчета концентраций химических веществ брызгальных бассейнов ответственных потребителей АЭС.

Одним из важнейших аспектов эффективной эксплуатации СТВ, независимо от выбранной системы охлаждения, является техногенная безопасность объекта. В данной работе под техногенной безопасностью СТВ понимается установление в диапазонах допустимых значений совокупности свойств и характеристик воды в условиях опасных техногенных событий путем подпитки-продувки благодаря организации рационального режима обмена воды.

Для корректного моделирования теплового режима мелких водоемов важно детальное описание как тепловых потоков между атмосферой и поверхностью воды, так и между водой и донными отложениями [1...3].

Вместе с тем, при эксплуатации СТВ возникают характерные научно-технические проблемы, к которым, в частности, относятся повышения карбонатной жесткости воды в брызгальных бассейнах ответственных потребителей АЭС и концентрации меди, сульфатов и других химических в воде водоема-охладителя (ВО) [3...5].

Целью работы является разработка математической модели расчета концентраций химических веществ брызгальных бассейнов ответственных потребителей АЭС.

Математическая модель для расчетов концентраций солей металлов (консервативных веществ) и нормируемых веществ, склонных к трансформации (неконсервативных веществ), характерных для систем технического водоснабжения Ростовской АЭС и Запорожской АЭС.

Исходные уравнения для расчета гидрохимического режима основаны на законе сохранения массы и для описанных условий выражаются в виде уравнения баланса воды (1) и баланса веществ примесей (2) [2,5...8]:

$$\frac{dV}{dt} = \sum_i Q_i + Q_{oc} - Q_{ucn} - Q_s, \quad (1)$$

$$\frac{d(C \cdot V)}{dt} = \sum_i Q_i \cdot C_i + Q_{oc} \cdot C_{oc} - Q_s \cdot C - k \cdot C \cdot V + F_c, \quad (2)$$

где V – текущий суммарный объем водоема-охладителя и других объектов оборотного водоснабжения, м^3 ; t – время, с ; Q_{oc} – расход воды на атмосферные осадки, $\text{м}^3/\text{с}$; Q_s – суммарный расход воды, выходящей из ВО со всеми потерями (фильтрация, продувка, унос из брызгальных бассейнов и градилен и т.д.), $\text{м}^3/\text{с}$; Q_i – расход воды из различных источников (с учетом их знака: «плюс» — приток, «минус» — отток), например, $Q_1 = Q_{CT}$ (расход воды очищенных хозяйственно-бытовых стоков), $Q_2 = Q_{nn}$ (расход воды подпитки ВО) и т.д.; Q_{ucn} – суммарные потери воды на испарение, $\text{м}^3/\text{с}$; C – текущая концентрация показателя качества воды в ВО, $\text{г}/\text{м}^3$; C_i – концентрация показателя качества воды в i -том источнике воды, который поступает в ВО (такими источниками, в частности, могут быть: технологические установки химической водоочистки, вода подпитки, сточные воды очистных сооружений, воды рек, ручьев и т.д.), $\text{г}/\text{м}^3$ ($i = 1, 2, \dots$); k – коэффициент неконсервативности для неконсервативных веществ, $1/\text{сут}$; F_c – интенсивность источника (положительного или негативного) поступления в ВО веществ, рассматриваемые, без взвешенных составляющих водного баланса, $\text{г}/\text{сут}$.

В общем случае общие потери воды на испарение учитывают потери с поверхности ВО (Q_{uc}), брызгальных бассейнов (Q_{ucb}) и градилен (Q_{ucg}), если последние находятся в едином оборотном цикле с ВО.

Все перечисленное указывает на актуальность и необходимость определения этих коэффициентов для каждого сезона с целью учета влияния перечисленных выше внутриводоемных процессов на динамику концентраций исследуемых веществ. Практика подобных исследований показывает, что для некоторых показателей в отдельные сезоны возможно получение отрицательных значений для некоторых коэффициентов неконсервативности [60], как по указанным выше причинам, так и за счет поступления веществ от неучтенных при натурных измерениях источников.

При представлении левой части уравнения (2) в виде:

$$\frac{d(C \cdot W)}{dt} = W \cdot \frac{dC}{dt} + C \cdot \frac{dW}{dt}, \quad (3)$$

где W – синхронизированный со временем объем водохранилища.

Из двух уравнений (3) и (4) следует уравнение для определения концентрации веществ $C = C(t)$

$$\frac{dC}{dt} = M - R \cdot C - k \cdot C, \quad (4)$$

$$\text{Где } M = \left(\sum_i Q_i \cdot C_i + Q_{oc} \cdot C_{oc} + F_c \right) / W; \quad R = \left(\sum_i Q_i + Q_{oc} - Q_{исп} \right) / W.$$

Для решения уравнения (4) необходимо знание искомой концентрации вещества в начальный момент времени (начальные условия), то есть, $C(t=0) = C_0$, а также всех (кроме C) величин, входящих в правую часть (4), которые в общем случае должны быть известны и могут зависеть от времени, включая синхронизированный со временем объем водохранилища W . Уравнение (4) является дифференциальным уравнением первого порядка, методы интегрирования которого известны, в частности, для общего случая удобен достаточно точный и вычислительно устойчивый метод Рунге-Кутты с формулами аппроксимации четвертого порядка. Этот метод используется в расчетной части настоящей математической модели.

Метод Рунге-Кутты в приложении к дифференциальному уравнению вида $C' = f(t, C)$ используется для решения задачи расчета гидрохимического режима. Введем обозначения при начальном условии $C(t_0) = C_0$ и шаге Δt :

$$t_0 + j \cdot \Delta t = t_j, \quad C(t_j) = C(t_0 + j \cdot \Delta t) = C_j, \quad f(t_j, C_j) = f_j, \quad (j=0, 1, 2, \dots).$$

Итерационная формула для нахождения C_{j+1} имеет вид:

$$C_{j+1} = C_j + 1/6 \cdot (j_1 + 2 \cdot j_2 + 2 \cdot j_3 + j_4),$$

где

$$\begin{aligned} j_1 &= f_j \cdot \Delta t = F(t_j, C_j) \cdot \Delta t, \\ j_2 &= f(t_j + \Delta t / 2, C_j + j_1 / 2) \cdot \Delta t, \\ j_3 &= f(t_j + \Delta t / 2, C_j + j_2 / 2) \cdot \Delta t, \\ j_4 &= f(t_j + \Delta t, C_j + j_3) \cdot \Delta t. \end{aligned}$$

Математической моделью предусмотрено определение концентраций веществ трех типов: консервативных веществ, неконсервативных веществ и неконсервативных веществ с последующей трансформацией.

Перечень характеристик гидрохимических показателей качества воды, определение которых предусмотрено математической моделью.

Математической моделью предусмотрено определение концентраций веществ трех видов: консервативных веществ, неконсервативных веществ и неконсервативных веществ с последовательной трансформацией.

В случае если в водный объект (ВО, река и т.п.) поступает определенная масса вещества, согласно закону сохранения массы, возможны два события при отсутствии внешних источников:

– за время наблюдения масса вещества не изменилась. В этом случае говорят, что в данных условиях, в данном водном объекте данное вещество является консервативным;

– за время наблюдения масса вещества изменилась. В этом случае говорят, что в данных условиях, в данном водном объекте данное вещество является неконсервативным.

При этом отмечается, что в водном объекте имеет место изменение массы другого вещества; значит, часть первого вещества трансформировалась во второе вещество. Коэффициент пропорциональности между первоначальной массой и ее дефицитом назван коэффициентом трансформации [3,9...10].

Заключение.

В заключение отметим, что авторами теоретически обоснована структура усовершенствованного мониторинга качества воды систем оборотного водоснабжения на основе системного анализа техно-экосистемы АЭС с использованием методов математического моделирования и средств вычислительной техники.

Обоснованы в рамках теоретической гидравлики уравнения в частных производных, отображающие законы сохранения массы воды (оборотной) и примесей. В дальнейшем планируется публикация, полученных с использованием численных методов решения уравнений относительно динамики концентраций веществ примесей и коэффициентов неконсервативности. Особенностью данного подхода является то, что при использовании развернутых во времени данных натурных измерений относительно концентраций контролируемых веществ автоматически реализуются такие существенные аспекты математической модели, как ее калибровка и верификация.

Библиографический список.

1. Макаров И.И. Моделирование гидротермических процессов водоемов-охладителей ТЭС и АЭС / И.И. Макаров, А.С. Соколов, В.С. Шульман – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 174 с.
2. Мороз В.А., Беженар Р.В., Наземцева Г.И. Особенности моделирования гидротермического режима водоемов-охладителей АЭС: Сб. науч. тр. СТУЯЭиП – 2013, №1(45). С. 95-103.
3. Мороз В.А. Адаптация математической модели прогноза гидрохимического режима системы технического водоснабжения Хмельницкой АЭС / В.А. Мороз, Н.А. Мороз, Г.И. Наземцева // Сб. науч. Тр. СТУЯЭиП. – 2013. – №3(47). – С. 22-29.
4. Zillmann J.W. A study of some aspects of the radiation and the heat budgets of the southern hemisphere oceans / J.W. Zillmann. – Bur. Of Meteorol.,

- Dept. of the Interior, Canberra, Australia, 1972. – 562 p. – (Meteorol. Stud., 26.)
5. Paltridge G.W. Radiative processes in Meteorology and climatology / G.W. Paltridge, C.M.R. Platt. – New York: Elsevier Scientific publishing company, 1976. – 311 p.
6. Mellor G.L. User's guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model / G.L. Mellor. – Princeton University, 2003. – 53 p.
7. Rosati A. General circulation model for upper ocean simulation / A. Rosati, K. Miyakoda // J. Phys. Ocean. – 1988. – 18. – P. 1601 - 1626.
8. Беженар Р.В. Адаптация трехмерной численной модели ТРИТОКС для прогнозирования гидрохимического режима водоема-охладителя Запорожской АЭС / Р.В. Беженар, Н.А. Мороз, Л.Л. Савелий // 3б. наук. пр. СКУЯЕтаП. – Севастополь: СКУЯЕиП, 2012. – Вып. 1 (41). – С. 70 – 76.
9. Мороз В.А. Аналитический метод исследования математических моделей потоков энергии в водных экосистемах атомной станции / В.А. Мороз, Д.В. Моисеев, Н.А. Мороз // Системы контроля окружающей среды. – 2025. – № 1(59). – С. 100-109.
10. Мороз В.А. Имитационное моделирование гидрохимического режима системы технического водоснабжения Ростовской АЭС / В.А. Мороз, М.А. Костов, Т.Н. Замыслова // НАУКА МОЛОДЫХ 2022 : сборник статей III Международного научно-исследовательского конкурса, Петрозаводск, 19 декабря 2022 года. Том Часть 1. – Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука» (ИП Ивановская И.И.), 2022. – С. 10-20. – EDN TKQRAU.

¹*Мороз Владимир Анатольевич, соискатель, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

²*Моисеев Дмитрий Владимирович, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, dvmoiseev@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

Moroz Vladimir Anatolyevich, Applicant, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Moiseev Dmitry Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department, dvmoiseev@mail.sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

ОЦЕНКА МЕТОДА МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВЫБОРА КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Рубцов Ю.В.¹

EVALUATION OF THE MACHINE LEARNING METHOD FOR THE AUTOMATED SELECTION SYSTEM OF COMPONENT BASE RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT

Rubtsov Yu.V.¹

Аннотация. Предложены и исследованы методы машинного обучения для систем автоматизированного выбора электронной компонентной базы при разработке радиоэлектронной аппаратуры. Предложены алгоритмы соответствующего программного обеспечения. Предложены методы проверки полученных результатов с помощью набора обоснованных метрик оценки моделей. Идеи и разработанное программное обеспечение апробированы и внедрены в электронной промышленности на предприятии ЦКБ «Дейтон».

Abstract. Machine learning methods automated selection systems of electronic component base in the development of electronic equipment are proposed and investigated. Algorithms for the corresponding software are proposed. Methods for checking the obtained results using a set of justified metrics for evaluating models are proposed. Ideas and the developed software have been tested and implemented in the electronics industry at the Central Design Bureau "Dayton".

Ключевые слова. Информационная система, искусственный интеллект, электроника, компонентная база, системный анализ, принятие решений, управление основными данными, MDM.

Keywords. Information system, artificial intelligence, electronics, component base, system analysis, decision making, master data management, MDM.

Введение.

Разработка радиоэлектронной аппаратуры (далее – РЭА) требует эффективного инструментария для быстрого и оптимального выбора изделий электронной компонентной базы (далее – ЭКБ). Если при этом необходимо пользоваться различными источниками сведений, эта деятельность становится трудоёмкой, а результат недостаточно качественным. Разработчик при выборе ЭКБ должен руководствоваться

большим количеством сведений об изделиях, необходима возможность достоверного сравнения однотипных комплектующих изделий по целому ряду показателей. Некоторые свойства могут оказаться отсекающими, то есть при несоответствии каким-то требованиям данные изделия не могут быть применены. Другие свойства могут быть относительно просто ранжированы по качеству в терминах «лучше» и «хуже». Наконец, третьи группы свойств могут быть оценены не по столь однозначным критериям, а в зависимости от предъявляемых к ним требований. Кроме того, разработчик РЭА сталкивается с дилеммой, когда одни ЭКБ могут обладать одной группой преимуществ, а другие – другой, так что выбор состоит в отыскании компромисса, зависящего от характеристик, включающих и технические характеристики, и коммерческие, и доступность ЭКБ, и их надёжность, долговечность и т.п.

Для решения этих задач необходимо создание информационных систем (далее – ИС) управления основными данными (master data management, MDM). Здесь термин управления данными предполагает сортировку данных по любому из признаков, и получение полных сведений об ЭКБ и другие действия, для содействия принятию оптимальных решений. Такой подход в комплексе требует применение интеллектуального анализа данных [1], который обеспечит их актуальность, достоверность, полноту и достаточность. Этой задаче посвящено значительное число современных исследований [2...16] в области технологий искусственного интеллекта, в том числе с использованием машинного обучения (далее – МО) [4...10] и нейронных сетей [11...16].

Интеллектуальный анализ данных ЭКБ включает прогнозирование, кластеризацию, верификацию, распознавание образов данных, приведение к единым стандартам [2]. В частности, даже использование избыточно расширенного алфавита математических символов может стать проблемой для внесения сведений в ИС, допускающую только кириллицу, основные числа и наиболее употребительные символы латиницы, но не допускающую, например, греческие буквы, надстрочные и подстрочные индексы, математические символы « $\sqrt{\quad}$, $\pm$, $\leq$, $\geq$, $\times$, Δ , Σ , μ , π » и другие, часто используемые в описаниях ЭКБ. Вместо них необходимо принять стандартную замену на символы или группу символов латиницы, как, например, соответственно, «sqrt, +/-, =<, =>, X, delta, sigma, u, pi» и так далее.

В данной статье рассматриваются некоторые аспекты оценки метода МО такой ИС, необходимой для выбора ЭКБ при разработке РЭА.

1. Актуальность темы.

По итогам проведенных опросов, совещаний и форумов можно

утверждать, что разработчики РЭА не удовлетворены существующими ИС. Необходимость создания актуальной и регулярно пополняемой ИС для этих целей требует разработки формализованных описаний, моделей, алгоритмов и программ, обеспечивающих реализацию процессов сбора актуальной и достоверной информации.

2. Степень разработанности.

Автором разработаны методы классификации плоских QFN-корпусов. Они могут быть применены для других типов ЭКБ. Исследованы технологии ICMH (Informatio Classification, Marking and Handling) – как совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих методов и инструментов, применяемых для решения задач сбора, обработки и анализа информации и получения достоверных данных в процессах сбора, обработки и анализа информации. Результаты сбора, анализа и обобщения информации о выводных рамках, как элементов изделий ЭКБ, опубликованы и применены автором в данной работе. Рассмотрены методы использования конструкторами моделей ЭКБ, применяемых при разработке РЭА, в том числе IBIS-моделей (Input/Output Buffer Information Specification – спецификация, описывающая входные и выходные буферы интегральных схем), на примере микросхем концентраторов сетей. Также исследована автоматизация процессов подбора аналогов ЭКБ. Научной новизной разработки является использование пространств процессов и оптимизационного пространства управления ими.

Каждый процесс, при выполнении задачи сбора информации об изделиях ЭКБ, направлен на реализацию вполне определенной цели. Следовательно, центральным компонентом описания таких процессов являются действия (F), направленные на обрабатываемые информационные объекты Системы (X) с целью получения требуемых результатов (Y). Для реализации такого процесса используются компоненты: а) программно-технические средства (W); б) источники информации (I); в) методы опроса (F_1); г) методы сбора информации из документальных источников (F_2); д) методы наблюдения (F_3).

Формальная модель может быть представлена кортежем: $M = \langle X, Y, F, W \rangle$, где $F = \{F_1, F_2, F_3\}$. Если необходимо опросить предприятие C на предмет наличия изменений A в конструкторской документации для изделия B , методом опроса F_1 , с помощью программно-технических средств W , с целью получения требуемых результатов Y и размещения их в обрабатываемые информационные объекты Системы X , формальная модель может быть представлена кортежем следующего вида: $M_C = \langle X, Y, F_1, W \rangle$.

Для реализации дерева решений на выбор ЭКБ разработан алгоритм, показанный на Рис.1.

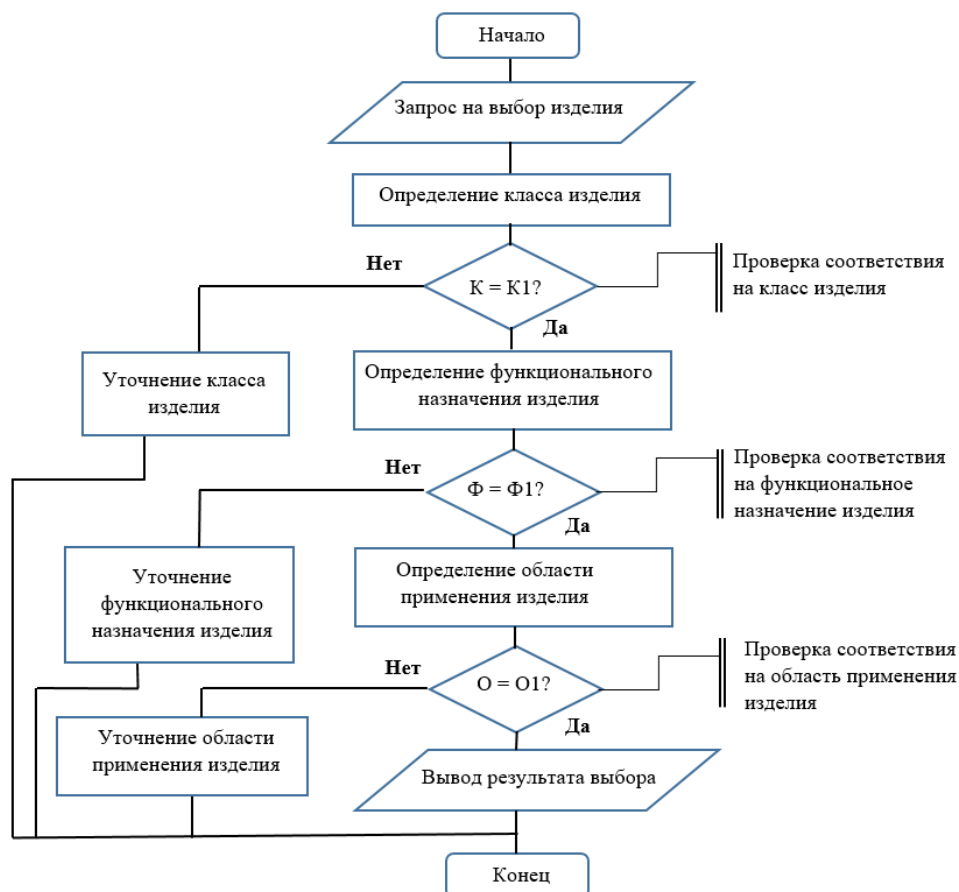


Рис.1 – Алгоритм дерева решений на выбор изделий ЭКБ согласно класса, функционального назначения и области применения

Также разработан алгоритм управления потоком информации в зависимости от ее типа, генерирующий управляющие воздействия на основе информации, полученной от внешних источников (Рис.2).

При сопоставлении информационных образов изделий ЭКБ идет активная избирательная переработка информации, связанная с поиском отличительных признаков между образами и установлением отношений между ними. Завершается опознание альтернативными ответами или переходом на более определенный уровень. Соответствующий алгоритм показан на Рис.3. Информация об изделии поступает в блок исследования признаков и формирования образа. В этот же блок из базы данных (БД) через оперативную память поступают эталонные гипотезы, которые проходят через блок учета априорных вероятностей. На основании учета априорной информации, поэлементного или целостного сопоставления сформированного образа с эталонами выбирается гипотеза и оценивается ее апостериорная вероятность. В основном, при опознании отдельных объектов на основе использования независимых, равновероятных, прямых признаков, этот процесс с известной степенью приближения описывается теоремой Байеса.



Рис.2 – Алгоритм управления потоком информации в зависимости от ее типа



Рис.3 – Алгоритм выбора эталонной гипотезы

Даже упрощённое дерево решений остаётся избыточно сложным для визуального восприятия и интерпретации. В этом случае целесообразно извлечь из дерева решающие правила и организовать их в наборы, описывающие классы. После построения дерева решений его тестируют на новых данных, чтобы убедиться, что оно правильно функционирует. Показатель оценки точности построенного дерева решений $K_{др}$ – это отношение количества правильных решений $N_{пр}$, выполненных моделью, к общему количеству решений N_{Σ} , а именно: $K_{др} = N_{пр}/N_{\Sigma}$.

4. Оценка метода.

Для оценки метода МО введём матрицу ошибок, которая может быть рассчитана как для двоичной, так и для более сложной классификации. В случае двоичной классификации матрица ошибок представлена в Таблице 1.

Таблица 1 – Классификация и ответ модели

Классификация / ответ модели	Да	Нет
Да	Положительный (П)	Ложно отрицательный (ЛО)
Нет	Ложно положительный (ЛП)	Отрицательный (О)

Точность модели T_m рассчитывается по формуле (1):

$$T_m = \frac{П + О}{П + О + ЛП + ЛО} \times 100\%. \quad (1)$$

Точность модели показывает долю правильно интерпретированных записей в наборе данных (П и О) от общего количества записей в наборе данных.

Этот показатель имеет ряд недостатков: а) не учитывает дисбаланс классов; б) не даёт информацию о типе ошибок модели; в) он зависит от порога классификации, изменение которого может значительно повлиять на значение точности.

Чувствительность $Ч_m$ рассчитывается по формуле (2):

$$Ч_m = \frac{П}{П + ЛО} \times 100\%. \quad (2)$$

Чувствительность показывает долю ЭКБ с положительным результатом на фоне числа ЭКБ с ложноотрицательным результатом (т. е. вероятность того, что ЭКБ будут корректно выбраны с помощью модели). Особое внимание этой оценке уделяется, когда в поставленной перед моделью задаче ошибка пропуска ЭКБ высока, например, при выборе дефицитных ЭКБ. Чувствительность показывает, какова будет доля ЭКБ, у которых выбор даст положительный результат. Чем выше чувствительность, тем реже с ее помощью будут появляться ошибки. Чувствительность как оценка модели может применяться для исключения ошибок для ЭКБ с близким подобием, когда требуется сузить круг

предполагаемых к применению в РЭА ЭКБ. Необходимо также отметить, что чувствительность может дать много ложных срабатываний, что требует дополнительных затрат на дальнейшее исследование. Чувствительность наиболее информативна при отрицательном результате, т.е. конструктор будет более уверен в том, что не пропустил результат.

Специфичность C_m рассчитывается по формуле (3):

$$C_m = \frac{O}{O + ЛП} \times 100\%, \quad (3)$$

где O – отрицательный ответ модели; ЛП – ложно положительный ответ модели.

Специфичность показывает долю выбранных ЭКБ с отрицательным результатом применения на фоне ложноположительных. Если число ЭКБ с ложноположительным результатом выбора классификаций велико, т.е. модель допустила большое количество ошибок, распознав отрицательные примеры как положительные, то специфичность стремится к нулю. Напротив, если же число ложноположительных результатов стремится к нулю, то специфичность стремится к 100%. Модель, обладающая высокой специфичностью, обеспечивает большую вероятность правильного распознавания действительно отрицательных случаев.

Прогностическая ценность положительного результата **ПРЦП** рассчитывается по формуле (4):

$$\text{ПРЦП} = \frac{\Pi}{\Pi + ЛП} \times 100\%. \quad (4)$$

Находится вероятность оптимального выбора изделий на фоне ошибок для других изделий. Важность этой метрики определяется тем, насколько высока для рассматриваемой задачи цена ложно положительного результата. Положительная прогностическая ценность возрастает по мере того, как положительный результат чаще встречается в выборке, на которой выполняется оценка.

Прогностическая ценность отрицательного результата **ПРЦО** рассчитывается по формуле (5):

$$\text{ПРЦО} = \frac{O}{O + ЛО} \times 100\%. \quad (5)$$

Оценена вероятность отрицательного результата на фоне отсутствия в выборке подходящих ЭКБ. Тесты с высокой чувствительностью увеличивают отрицательную прогностическую ценность. Это связано с тем, что у большего числа ЭКБ с положительным результатом теста с высокой чувствительностью появляется меньше ложноотрицательных результатов.

Для принятия решения о приемлемости подхода с точки зрения

модели в условиях реальной практики выбора ЭКБ, методом МО были найдены оптимальные пороговые значения Π_1 и Π_2 , позволяющие оценить предлагаемые параметры. Эти два значения разделяют три ситуации по каждому параметру модели, как показано в Таблице 2. Численные значения пороговых значений даны в Таблице 3.

Таблица 2 – Пороговые значения для оценивания параметра модели

Значение	Решение
$< \Pi_1$	Параметр модели имеет низкое значение, его использование в реальной практике недопустимо
$\Pi_1 - \Pi_2$	Параметр модели имеет перспективное значение, но требуется ее улучшение до более высокого значения
$> \Pi_2$	Параметр модели имеет приемлемое значение, ее можно использовать

Таблица 3 – Пороговые значения для оценивания точности модели

	T_m	$Ч_m$	C_m	ПРЦП	ПРЦО
Π_1	0,5	0,5	0,52	0,6	0,6
Π_2	0,79	0,78	0,82	0,81	0,81

Все рассмотренные выше метрики относились к двоичной задаче, но, в данном случае, классов больше, чем два. Это обуславливает необходимость обобщения рассмотренных метрик. Одним из возможных способов – вычисление средней метрики по всем классам.

Существует два подхода: один против всех или попарное сравнение.

Подход «один против всех» – наиболее часто используемой и заключается в создании двоичных классификаторов для каждого класса. Например, если есть три класса (A, B, C), то создается три классификатора: один для класса A против ($B+C$), второй для класса B против ($A+C$) и третий для класса C против ($A+B$). Затем для прогноза при новых данных, каждый классификатор предсказывает вероятность принадлежности объекта к своему классу, и выбирается класс с наибольшей вероятностью. Помимо вычислительной эффективности, одним из преимуществ этого подхода является его интерпретируемость.

Подход «попарное сравнение» позволяет создавать отдельный классификатор для каждой пары классов. Во время прогнозирования выбирается класс, дающий наибольший результат. Этот подход работает медленнее, чем «один против всех», из-за его сложности.

В завершении используется метрика среднего значения точности – это способ измерения точности модели для различных классов в выборке, усредняя эти показатели и формируя общее число, которое показывает, насколько точно модель может выбирать изделия ЭКБ для применения в РЭА. Её основное отличие - для расчёта не используется линейная

интерполяция. Вместо этого формируется средневзвешенное значение, а в качестве веса используется увеличение значения по сравнению с предыдущим.

5. Заключение.

Исследования в этой области [17...21] обеспечили создание набора методов и средств для решения поставленных задач [22...28].

В частности, программы для измерения микродефектов [22,23] совместно обеспечивают автоматизированное измерение дефектов ЭКБ на изображении, полученному с помощью компьютерного зрения для их оценки и определения возможности их дальнейшего применения на основании результатов МО и работы нейронных сетей. Программа [23] обеспечивает автоматизированную настройку параметров изображения для однозначного определения и дальнейшей оценки дефектов ЭКБ. Информация о дефектах ЭКБ используется как параметр их выбора и оценки возможности применения в определенных условиях.

Программа [24] переводит сложные, масштабные, числовые данные в визуальное представление, которое облегчает восприятие специалистами. Это – данные с информацией об ЭКБ: функциональное назначение, область применения, параметры, показатели, результаты применения, требования к монтажу; например, обеспечивается визуализация данных о внешнегабаритных размерах микросхемы в посадочное место для монтажа ЭКБ на печатную плату.

Программа [25] создает базу данных и манипулирует данными (вставляет, обновляет, удаляет и выбирает). Программа обеспечивает безопасность, надёжность хранения и целостность данных, предоставляет средства для администрирования базы данных и ориентирована на данные об ЭКБ, с учетом специфики их описания.

Программа [26] используется для управления данными об ЭКБ. С помощью этой программы осуществляется управления большими массивами данных, необходимых на этапах разработки, производства или ремонта РЭА, а также их эксплуатации, и утилизации. Программа интегрирует информацию различных форматов и типов, предоставляя её пользователям в структурированном виде, она работает не только с текстовыми документами, но и с моделями. Программа: выполняет автоматическую генерацию отчетов и выборок, обеспечивает неформализованный поиск необходимой информации.

База данных [27] разработана и используется для применения в ИС на этапах разработки РЭА и анализа ЭКБ, содержит 160 атрибутов по 4500 корпусам с привязкой к геометрическим размерам и применяемым материалам. В базу данных включены электронные чертежи корпусов и геометрические модели типа STEP – файлы для обмена данными между

CAD-системами, являются аббревиатурой от «STandard for the Exchange of the Product model data».

Библиографический список.

1. Lopez-Meneses E., Lopez-Catalan L., Pelicano-Piris N., Mellado-Moreno P.C. Artificial Intelligence in Educational Data Mining and Human-in-the-Loop Machine Learning and Machine Teaching: Analysis of Scientific Knowledge. Department of Education and Social Psychology, Pablo de Olavide University, Sevilla, Spain. 2025 – URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/2/772> (дата обращения: 05.05.2025).
2. Paul J.N. Electronics Component Classification Using Machine Learning. / J.N. Paul, M. Roy, J. Sengupta, K. Kumar [et al.] // International Research Journal of Engineering and Technology. Department of Electronics & Communication Engineering, Guru Nanak Institute of Technology, Kolkata, India, 2024 – URL: <https://www.irjet.net/archives/V11/i2/IRJET-V11I251.pdf> (дата обращения: 05.05.2025).
3. Ziaee A., Çano E. Batch Layer Normalization A new normalization layer for CNNs and RNNs. Design Computing Group, TU Wien, Austria, 2022 - URL: https://www.researchgate.net/publication/363667256_Batch_Layer_Normalization_A_new_normalization_layer_for_CNNs_and_RNN (дата обращения: 05.05.2025).
4. Li J. A study of advances in machine learning-based electronic design automation. Proceedings of the 2nd International Conference on Machine Learning and Automation. Department of Information Science and Engineering, Ocean University of China, 2024 - URL: https://www.researchgate.net/publication/385734577_A_study_of_advances_in_machine_learning-based_electronic_design_automation (дата обращения: 05.05.2025).
5. Горнев Е.С. Поиск начального приближения для задачи экстракции параметров модели мемристора с помощью методов машинного обучения / Е.С. Горнев, Д.А. Жевненко, В.С. Кожевников, Ф.П. Мещанинов, Е.С. Шамин // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2020. – 24(2). – URL: <https://met.misis.ru/jour/article/view/426/402> (дата обращения: 05.05.2025).
6. Mohammed S. The effects of data quality on machine learning performance on tabular data / S. Mohammed, L. Budach, M. Feuerpfeil, N. Ihde [et al.]. – Hasso Plattner Institute, University of Potsdam, Germany. 2025 – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306437925000341> (дата обращения: 05.05.2025).
7. Tas G. Classification of similar electronic components by transfer learning

- methods. Department of Mechatronics Engineering, Manisa Celal Bayar University, Manisa, Turkey. 2025 – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0952197624018165> (дата обращения: 05.05.2025).
8. Abbas R.M. Automated Electronic Component Selection: A Machine Learning approach. Faculty of Electrical Engineering, Mathematics & Computer Science University of Twente. Netherlands. 2022 – URL: https://essay.utwente.nl/90637/1/RIZVI_MBIT_EEMCS.pdf (дата обращения: 05.05.2025).
 9. Baratchi M. Automated machine learning: past, present and future / M. Baratchi, C. Wang, S. Limmer, J. N. van Rijn [et al.] // Leiden Institute of Advanced Computer Science, Leiden University, Leiden, The Netherlands. 2024 – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10462-024-10726-1> (дата обращения: 05.05.2025).
 10. Uysal F. Electronic Components Detection Using Various Deep Learning Based Neural Network Models / F. Uysal // Kafkas University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Electrical and Electronics Engineering, Kars-Turkiye, 2025 – URL: <https://www.ijcesen.com/index.php/ijcesen/article/view/855> (дата обращения: 05.05.2025).
 11. Горнев Е.С. Анализ применения мемристорных кроссбаров в задачах нейросетевой обработки / Е.С. Горнев, О.А. Тельминов // Труды V Международной конференции «Математическое моделирование в материаловедении электронных компонентов», Москва, 2023 – URL: <https://www.ipu.ru/node/79883> (дата обращения: 05.05.2025).
 12. Atik I. Classification of Electronic Components Based on Convolutional Neural Network Architecture / I. Atik // Department of Electrical and Electronics Engineering, Gaziantep Islam Science and Technology University, Gaziantep, Turkey, 2022 – URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/7/2347> (дата обращения: 05.05.2025).
 13. Nanni L. Stochastic Selection of Activation Layers for Convolutional Neural Networks / L. Nanni, A. Lumini, S. Ghidoni, G. Maguolo // Department of Information Engineering, University of Padua, Italy, 2020 – URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/6/1626> (дата обращения: 05.05.2025).
 14. Nanos G. Neural Networks: Pooling Layers. National Technical University of Athens. Greece, 2025 – URL: <https://www.baeldung.com/cs/neural-networks-pooling-layers> (дата обращения: 05.05.2025).
 15. Luca G.D. How ReLU and Dropout Layers Work in CNNs. British Columbia Institute. Canada, 2024 – URL: <https://www.baeldung.com/cs/ml->

- relu-dropout-layers (дата обращения: 05.05.2025).
16. Li M. Comprehensive Review of Backpropagation Neural Networks. College of Mechanical Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi, China, 2024 - URL: https://www.researchgate.net/publication/378359601_Comprehensive_Review_of_Backpropagation_Neural_Networks (дата обращения: 05.05.2025).
17. Дормидошина Д.А. Применение ИСМН в процессах сбора, обработки и анализа информации о надежности изделий микроэлектроники / Д.А. Дормидошина, М.Л. Савин, Ю.В. Рубцов // «Нано- и микросистемная техника», Москва. – 2020. – Т. 22, № 9 – URL: <https://www.deyton.ru/doc/ISSN18138586.pdf> (дата обращения: 05.05.2025).
18. Гагарина Л.Г. Особенности разработки метода классификации плоских QFN-корпусов для применения в составе автоматизированных систем технической подготовки производства изделий микроэлектроники / Л.Г. Гагарина, Ю.В. Рубцов // «Известия высших учебных заведений. Электроника», Москва. – 2022. – Т. 27(3). – URL: <https://www.deyton.ru/doc/QFNRubtsov.pdf> (дата обращения: 05.05.2025).
19. Дормидошина Д.А. Исследования и результаты сбора, анализа и обобщения информации о выводных рамках, применяемых в изделиях микроэлектроники / Д.А. Дормидошина, М.Л. Савин, Ю.В. Рубцов // «Нано- и микросистемная техника», Москва. – 2020. – Т. 22, №7. – URL: <https://www.deyton.ru/doc/CRENNAS.pdf> (дата обращения: 05.05.2025).
20. Алексеева А.В. Разработка IBIS-модели микросхем концентраторов сетей, применяемых для проектирования телекоммуникационной аппаратуры / А.В. Алексеева, Ю.В. Рубцов // «Нано- и микросистемная техника», Москва. – 2017. – Т. 19, № 6. – URL: https://www.deyton.ru/doc/ibis_10.07.2017.pdf (дата обращения: 05.05.2025).
21. Рубцов Ю.В., Оптимизация процессов подбора аналогов изделий электронной компонентной базы. Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника. 2015 – URL: [https://www.niime.ru/upload/zhurnal-mikroelektronika/%D0%92%D1%8B%D0%BF%D1%83%D1%81%D0%BA%203%20\(159\)%202015.pdf](https://www.niime.ru/upload/zhurnal-mikroelektronika/%D0%92%D1%8B%D0%BF%D1%83%D1%81%D0%BA%203%20(159)%202015.pdf) (дата обращения: 05.05.2025).
22. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024665824 Российская Федерация, Программа измерения микродефектов для системы оценки контроля качества изделий электронной техники с использованием технологий компьютерного зрения: заявка №2024664618: дата поступления 26.06.2024: дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 05.07.2024/ Дормидошина Д.А., Рубцов Ю.В.; заявитель АО «ЦКБ «Дейтон».

23. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024662887 Российская Федерация, Программа корректировки изображения для системы оценки контроля качества изделий электронной техники на базе компьютерного зрения: заявка №2024661413: дата поступления 21.05.2024: дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 21.05.2024/ Дормидошина Д.А., Рубцов Ю.В.; заявитель АО «ЦКБ «Дейтон».
24. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023614155 Российская Федерация, Программа визуализации данных об изделиях электронной техники: заявка №2023612746, дата поступления 14.02.2023: дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 27.02.2023/ Рубцов Ю.В., Дормидошина Д.А., Криницкий В.В., Курилов А.В., Окунев К.Е.; заявитель АО «ЦКБ «Дейтон».
25. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022683437 Российская Федерация, Программа формирования базы данных об изделиях электронной техники: заявка №2022682511, дата поступления 22.11.2022: дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 05.12.2022/ Рубцов Ю.В., Дормидошина Д.А., Криницкий В.В., Шишкова Ю.М., Окунев К.Е.; заявитель АО «ЦКБ «Дейтон».
26. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022668891 Российская Федерация, Программа управления данными об изделиях электронной техники: заявка №2022667557, дата поступления 27.09.2022: дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 13.10.2022/ Рубцов Ю.В., Дормидошина Д.А., Криницкий В.В., Владимиров А.И., Окунев К.Е.; заявитель АО «ЦКБ «Дейтон».
27. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2015621293 Российская Федерация, Корпуса ЭКБ: заявка №2015620803, дата поступления 26.06.2015: дата государственной регистрации в Реестре баз данных 26.08.2015/ Грязнова Т.В., Довгань И.Д., Рубцов Ю.В. заявитель АО «ЦКБ «Дейтон».

¹Рубцов Юрий Васильевич, генеральный директор,
Rubtsov@Deyton.ru, Россия, Москва, Зеленоград, АО «ЦКБ «Дейтон»

*Rubtsov Yuri Vasilievich, General Director of, Rubtsov@Deyton.ru,
Russia, Moscow, Zelenograd, JSC Central Design Bureau Dayton*

АСИМПТОТИЧЕСКОЕ СВОЙСТВО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПРИНУЖДЕНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ОПТИМАЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

Варминская Н.И.¹

ENERGY ENFORCEMENT ASYMPTOTIC PROPERTY IN OBJECTS' OPTIMAL MOTION MODELING

Varminskaya N.I.¹

Аннотация. Показана аналогия между принципом наименьшего принуждения и минимальным энергетическим принуждением при моделировании управляемого движения типа «разгон-торможение». Моделирование целенаправленных движений приводит к экономии энергии, что подтверждается приведенными примерами конструирования управлений (с наименьшим энергетическим принуждением) согласно алгоритму полной обратной задачи вариационного исчисления. На основании ранее выполненных и опубликованных исследований обращено внимание на актуальность полученных результатов и их практическое значение.

Abstract. The analogy between the least coercion principle and minimum energy enforcement in the acceleration- deceleration controlled motion modeling is shown. Modeling of targeted motions leads to energy savings that is confirmed by the given controls' designing examples (with the least energy coercion) according to the algorithm of the complete inverse problem of variational calculus. Based on previously performed and published studies, attention is drawn to the relevance of the obtained results and their practical significance.

Ключевые слова. Вариационное исчисление, полная обратная задача, принцип наименьшего принуждения, снижение энергоемкости целенаправленного движения, реверсионный принцип оптимальности (РПО), оптимальное управление, движение типа «разгон-торможение».

Keywords. Variational calculus, complete inverse problem, least coercion principle, energy consumption reduction of purposeful motion, reversal principle of optimality (RPO), optimal control, acceleration-deceleration type motion.

Введение.

Оптимальному управлению перемещением объектов, управлению колебаниями упругих систем посвящены работы [1...9] и другие. Управления могут быть обоснованы с использованием принципа наименьшего энергетического принуждения для достижения цели движения.

В [3] приведены варианты формулировок и применения принципа

наименьшего принуждения. Можно утверждать, что в действительном движении реализуется и наименьшее энергетическое принуждение. Возможны постановки задач, в которых цель управления задается краевыми условиями, а критерий оптимальности фактически появляется в конце реализации алгоритма.

В классическом вариационном исчислении при поиске управлений центральной является задача Лагранжа, в которой в качестве критерия оптимальности применяется известный квадратичный критерий.

Оптимальное управление удастся находить без предварительного задания критерия оптимальности [11,12]. Решение полных обратных задач вариационного исчисления (от заданной функции через уравнение Эйлера восстановление функционала-критерия) названо реверсионным исчислением.

В работах [11...14] обращено внимание на использование алгоритма решения полной обратной задачи вариационного исчисления для конструирования оптимальных управлений типа «разгон-торможение». Не исключается аналогия между принципом наименьшего принуждения [10] и при управлении типа «разгон-торможение» с минимальной энергоемкостью [11...18].

Цель исследований – использование алгоритма полной обратной задачи вариационного исчисления для поиска оптимального управления движением объекта, обеспечивающего снижение энергетических затрат на реализацию цели движения.

Основная часть.

Решение полной обратной задачи вариационного исчисления.

Пример 1. Управление в виде полинома:

$$U_e(t) = C_1 + C_2 t + C_3 t^2 + C_4 t^3,$$

где $C_1, C_2, C_3, C_4 = \text{const}$.

С учетом дополнительных условий косой симметрии управления

$$U_e(0) = a, \quad U_e(T) = -a, \quad \int_0^{T/2} U_e(t) dt + \int_{T/2}^T U_e(t) dt = 0, \quad \frac{dU_e}{dt} \left(\frac{T}{2} \right) = 0$$

получена система алгебраических уравнений для определения констант.

Далее из условия $S_e(t) - L = 0$ найден параметр a и для перемещения, скорости и ускорения (управления) получены выражения:

$$S_e(t) = \frac{Lt^2(5T^3 - 10T^2t + 10t^2T - 4t^3)}{T^5}, \quad V_e(t) = \frac{dS_e(t)}{dt}, \quad U_e(t) = \frac{dV_e(t)}{dt}. \quad (1)$$

Графики функций (1) изображены на Рис.1.

Пример 2. С увеличением степени полинома управления

$$U_e(t) = \sum_{i=1}^7 C_i t^{i-1}, \quad \text{при учете}$$

$$U_e(T/2) = 0, \quad \dot{U}_e(T/2) = 0, \quad \ddot{U}_e(T/2) = 0, \quad \dddot{U}_e(T/2) = 0, \quad \ddot{\ddot{U}}_e(T/2) = 0,$$

после определения констант и факторизации следуют выражения:

$$U_e(t) = \frac{14L(T-2t)^5}{T^7}, \quad V_e(t) = \frac{14Lt(T-t)(4t^2 - 2T + T^2)(4t^2 - 6Tt + 3T^2)}{3T^7},$$

$$S_e(t) = \frac{Lt^2(21T^5 - 70T^4t + 140T^3t^2 - 168T^2t^3 + 112Tt^4 - 32t^5)}{3T^7}. \quad (2)$$

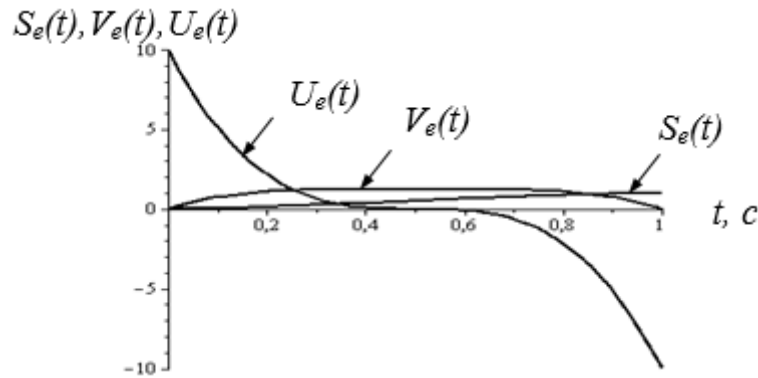


Рис.1 – Перемещение $S_e(t)$, скорость $V_e(t)$, ускорение $U_e(t)$
Графики функций (2) изображены на Рис.2.

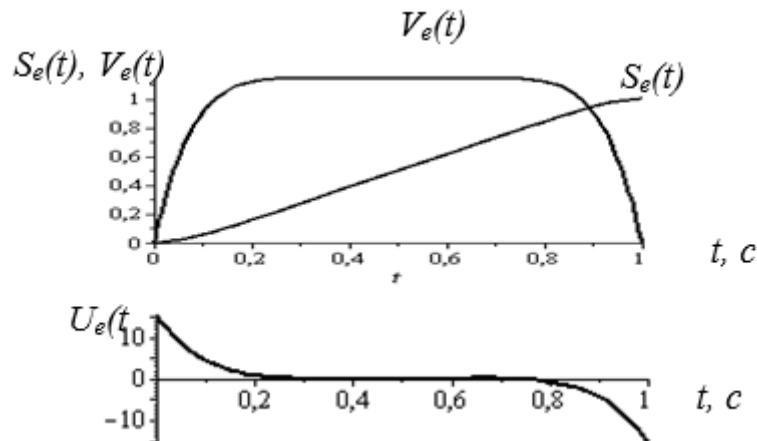


Рис.2 – Графики функций (2)

Для классического примера энергия $A = 2 \int_0^{T/2} UV dt = \frac{2,25L^2}{T^2}$, а в данном случае $A = \frac{1,3611L^2}{T^2}$, т.е. уменьшается на 39,5%.

Принципа наименьшего энергетического принуждения (ПНЭП).

Для управления типа «разгон-торможение» при заданном перемещении и времени движения

$$U_n = \frac{a(2n+4)(T-2t)^n}{T^n}, \quad a = \frac{L}{T^2},$$

где L – общее перемещение, T – время движения, n – нечетная степень полинома, мера энергетического принуждения (интеграл квадрата разности известного классического и нового управлений)

$$E_p = \frac{1}{2} \int_0^T (U_1 - U)^2 dt,$$

где $U_1 = \frac{6L(T-2t)}{T^3}$ согласно критерию $J = \int_0^T U_1^2 dt$, стремится к предельному значению с удалением избыточной энергии для достижения заданной цели движения.

Важно отметить свойство управлений, отражающее их асимптотическую близость с ростом степени полинома:

$$\Delta S = \int_0^T (U_n - U_{n-2})^2 dt \rightarrow 0, \quad n \rightarrow \infty.$$

Если в классической механике принцип наименьшего принуждения позволяет найти действительное движение среди кинематически возможных, то при конструировании управляемого движения принцип наименьшего энергетического принуждения отражает тенденцию снижения энергии для достижения цели движения, иллюстрируя энергетическое отличие конструируемого управления от известного (Рис.3).

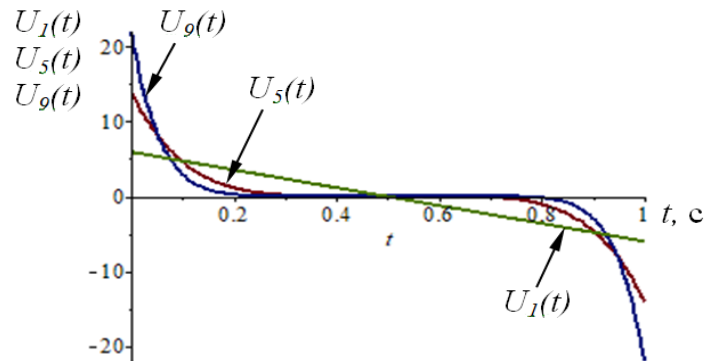


Рис.3 – Графики управления в зависимости от степени полинома n

$$U_1 = \frac{6L(T-2t)}{T^3}, \quad U_5(t) = \frac{14L(T-2t)^5}{T^7}, \quad U_9(t) = \frac{22L(T-2t)^9}{T^{11}}.$$

ПНЭП перекликается и с принципом наименьшего действия (например, в форме Ж.Л. Лагранжа), отражая в данном случае тенденцию снижения энергозатрат. Предельная экономия энергии приводит к постоянной скорости на всем временном участке движения, но, естественно, возникают практические трудности при задании такой скорости (разгоне) и ее устранении (торможении).

Для достаточно большой степени полинома функция управления $U_n(t)$ вызывает затруднение практической реализации, когда фактически

необходимо создать два импульса ускорения – разгона и торможения.

Характеристики оптимального движения при различных степенях полинома приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Обобщенные характеристики движения

Степень полинома n	Норма мощности $J_1 = \int_0^T U_e^2 dt$	Действие (по Лагранжу) $J_2 = \int_0^T V_e^2 dt$	Энергия $J_3 = 2 \int_0^{T/2} U_e V_e dt$	Скорость $V_e \left(\frac{T}{2} \right) = \int_0^{T/2} U_e dt$	Критерий НЭП $E_p = \frac{1}{2} \int_0^T (U_1 - U)^2 dt$
1	$\frac{12L^2}{T^3}$	$\frac{1,2L^2}{T}$	$\frac{2,25L^2}{T^2}$	$\frac{1,5L}{T}$	0
3	$\frac{14,2857L^2}{T^3}$	$\frac{1,1111L^2}{T}$	$\frac{1,5625L^2}{T^2}$	$\frac{1,25L}{T}$	$\frac{1,1428L^2}{T^3}$
5	$\frac{17,818L^2}{T^3}$	$\frac{1,0769L^2}{T}$	$\frac{1,3611L^2}{T^2}$	$\frac{1,166L}{T}$	$\frac{2,909L^2}{T^3}$
117	$\frac{241,038L^2}{T^3}$	$\frac{1,0042L^2}{T}$	$\frac{1,017L^2}{T^2}$	$\frac{1,0085L}{T}$	$\frac{114,52L^2}{T^3}$

Уменьшение энергии и действия с увеличением степени полинома ускорения приводит к росту величины удаленной избыточной энергии без нарушения цели оптимального переносного движения.

Заключение.

Моделирование управлений типа «разгон-торможение» приводит к существенной экономии энергии для реализации оптимального движения из исходного в конечное состояние покоя (при заданном времени движения и расстоянии). Каждый раз с ростом степени полинома ускорения (оптимальное управление) находится без предварительного задания критерия, который в данном случае является конечным результатом моделирования.

Теоретически обосновано существование конструируемых управлений (типа «разгон-торможение»), при которых перемещение из исходного в конечное состояние абсолютного покоя достигается с минимальным энергетическим принуждением.

Библиографический список.

1. Понтрягин Л.С. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С. Понтрягин, Б.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе, Е.Ф. Мищенко. – М.: Наука, 1969. – 384 с.
2. Красовский Н.Н. Теория управления движением / Н.Н. Красовский. – М.: Наука, 1968. – 476 с.
3. Маркеев А.П. О принципе наименьшего принуждения / А.П. Маркеев // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – № 1. – С. 113 – 121.
4. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: линейные модели / П.Д. Крутько. – М.: Наука, 1987. – 304 с.

5. Карновский И.А. Методы оптимального управления колебаниями деформируемых систем / И.А. Карновский, Ю.М. Почтман. – К.: Высш. шк., 1982. – 116 с.
6. Троицкий В.А. Оптимальные процессы колебаний механических систем / В.А. Троицкий. – Л.: Машиностроение, 1976. – 236 с.
7. Черноусько Ф.Л. Управление колебаниями / Ф.Л. Черноусько, П.Д. Акуленко, Б.Н. Соколов. – М.: Наука, 1980. – 384 с.
8. Сейдж Э.П. Оптимальное управление системами / Э.П. Сейдж, Ч.С. Уайт. – М.: Радио и связь, 1982. – 392 с.
9. Воронов А.А. Теория автоматического регулирования. Ч.П. Теория нелинейных систем автоматического регулирования / Под ред. А.А. Воронова. – М.: Госиздат, 1955. – 248 с.
10. Гаусс К. Об одном новом общем принципе механики / К. Гаусс // Вариационные принципы механики. – 1959. – С. 170 – 172.
11. Бохонский А.И. Реверсионный принцип оптимальности / А.И. Бохонский. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2016. – 174 с.
12. Бохонский А.И. Механика управляемого движения объектов / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, Т.В. Мозолевская. – М.: ИНФРА-М, 2021. – 170 с.
13. Бохонский А.И. Конструирование оптимальных управлений перемещением упругих объектов / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская. – С.-Пб: НИЦ МС, 2020. – 120 с.
14. Бохонский А.И. Оптимальное переносное движение объектов конечной жесткости / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, А.И. Рыжков. – СПб: Медиапапир, 2024. – 154 с.
15. Бохонский А.И. Оценка энергоемкости минимального принуждения целенаправленного движения объекта / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, А.И. Рыжков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2022. – № 1 (351). – С. 15 – 20.
16. Бохонский А.И. Алгоритм конструирования оптимального движения упругого объекта / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, Т.В. Мозолевская, А.И. Рыжков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2021. – № 4 (348). – С. 33 – 38.
17. Бохонский А.И. Экспериментальная проверка оптимального вращения упругого стержня / А.И. Бохонский, М.М. Майстришин, А.И. Рыжков // Автоматизация и измерения в машиноприборостроении. – 2020. – № 2 (10). – С. 3 – 16.
18. Бохонский А.И. Актуальные задачи вариационного исчисления / А.И. Бохонский. – Glivice: Palmarium Academic Publishing, 2013. – 77 p.

¹Варминская Наталья Ивановна, канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой, nvarminska@gmail.com, Россия, Севастополь, Черноморское высшее военно-морское училище имени П.С. Нахимова

Varminskaya Natalia Ivanovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department, nvarminska@gmail.com, Russia, Sevastopol, Black Sea Higher Naval School named after P.S. Nakhimov

ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С УЧЕТОМ ДИАГНОСТИКИ ИЗНОСА ПОДШИПНИКОВ

Заморёнов М.В.¹, Моисеев Д.В.², Малицкая А.А.³, Ченгарь О.В.⁴

VERIFICATION OF AN ELECTRIC MOTOR RELIABILITY ASSESSMENT MODEL WITH BEARING WEAR DIAGNOSTICS ACCOUNTING

Zamoryonov M.V.¹, Moiseev D.V.², Malitskaya A.A.³, Chengar O.V.⁴

Аннотация. В статье при помощи среды имитационного моделирования AnyLogic строится имитационная модель оценки надежности промышленного электродвигателя с учетом диагностики износа подшипников. Путем проведения сравнения результатов имитационного и аналитического моделирования проводится верификация аналитической и имитационной моделей оценки надежности промышленного электродвигателя с учетом диагностики износа подшипников. Производится расчет коэффициента готовности исследуемой системы.

Abstract. The article presents the development of a simulation model for reliability assessment of an industrial electric motor, incorporating bearing wear diagnostics, using the AnyLogic simulation environment. Verification of both analytical and simulation models for reliability evaluation of the industrial electric motor is performed through comparative analysis of simulation and analytical modeling results. The system's availability factor is calculated.

Ключевые слова. Промышленный электродвигатель, имитационная модель, верификация модели, коэффициент готовности.

Keywords. Industrial electric motor, simulation model, model verification, availability factor.

Введение. Моделирование технических систем – это важнейший этап проектирования, который открывает возможность находить и исправлять ошибки ещё до воплощения системы в реальность. От точности модели напрямую зависит, насколько успешно будет работать будущая система, поэтому такую значимость приобретает верификация – тщательная проверка, подтверждающая, что модель действительно отражает реальные физические процессы [1...3].

Это не просто формальность, а ключевой процесс, где каждое решение влияет на результат. Когда модель проходит проверку, она становится надёжным инструментом, способным предсказать поведение

системы в разных условиях. И именно верификация превращает теоретические расчёты в рабочий прототип, готовый к реализации.

Грамотное моделирование и последующая проверка – это гарантия того, что система будет работать так, как задумано, без неожиданных сбоев. И это тот этап, на котором экономится время, ресурсы и, главное, – нервы разработчиков.

Целью данной работы является верификация аналитической модели оценки надежности электродвигателя с учетом диагностики износа подшипников, представленной в [4]. Для достижения этой цели решается задача сравнения результатов аналитического и имитационного моделирования.

Верификация проводится методом имитационного моделирования [5,6], который позволяет исследовать поведение системы в различных условиях. На основе разработанной аналитической модели создается ее имитационный аналог, учитывающий динамические параметры и внешние воздействия.

В качестве инструментальной платформы выбрана система AnyLogic [7,8] – мощная интегрированная среда имитационного моделирования, сочетающая возможности визуального проектирования с текстовым программированием на специализированном языке. Данная платформа поддерживает создание как типовых, так и специализированных моделей сложных систем.

Система AnyLogic обеспечивает автоматическое управление параллельными дискретными процессами в рамках единого модельного времени, предоставляя при этом гибкие механизмы настройки правил синхронизации событий. Платформа включает комплекс инструментов для динамической отладки моделей в реальном времени, управления ходом экспериментов и автоматизированной обработки результатов моделирования [9...11].

Опишем функционирование системы [4].

Время её безотказной работы – α_1 , время восстановления – β_1 . В случайный момент времени (через промежутки α_2 – время до диагностики подшипника) проводится диагностики, время проведения которой – β_2 . Если диагностика выявила износ подшипника, то проводится его замена. Время износа подшипника – α_3 , время его замены – β_3 .

Для описания функционирования системы используем полумарковские состояния [9...12]:

$$E = \{S_{000}, S_{0x10y}, S_{0x00y}, S_{0w0z1}, S_{100}, S_{002}\},$$

где S_{000} – система начала работу после восстановления; S_{0x10y} – начало диагностики, время до отказа системы – x , время до износа подшипника –

y ; S_{0x00y} – система продолжила работу после диагностики, время до отказа системы – x , время до износа подшипника – y ; S_{100} – система отказала, идет восстановление; S_{0w0z1} – подшипник изнашивается, до время диагностики – w , время до отказа системы – z . S_{002} – диагностирован износ подшипника, идет его замена.

Граф состояний системы приведен на Рис.1.

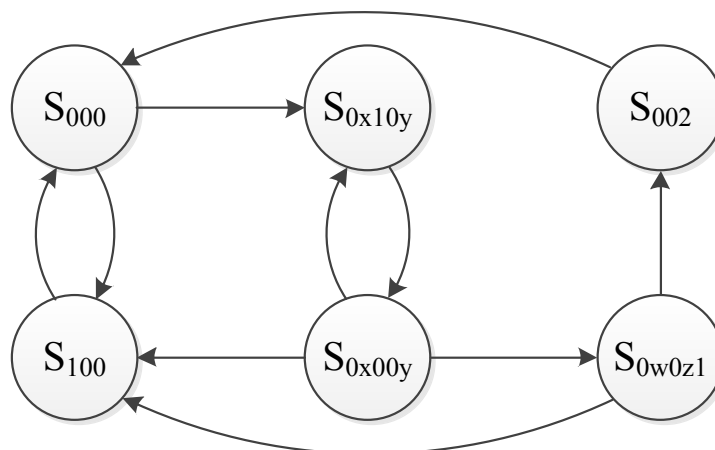


Рис.1 – Граф состояний системы

Структура, моделирующая наработку на отказ исследуемой системы, представлена на Рис.2.

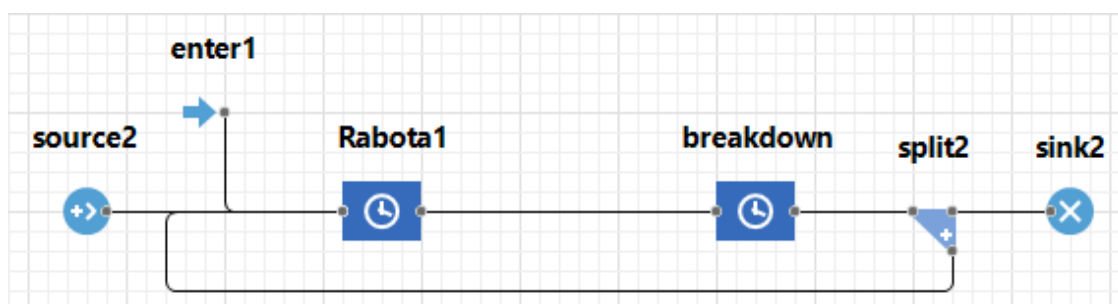


Рис.2 – Нарботка на отказ и восстановление промышленного электродвигателя

На Рис.3 представлена структура, моделирующая износ подшипника и его восстановление после диагностики, а также структура проведения диагностики. Блоки *Rabota1* и *breakdown* имитируют наработку на отказ системы и ее восстановление соответственно. Блоки *diagnostics* и *diagnostics1* моделируют время между диагностиками и время проведения диагностики подшипников. Блоки *Rabota*, *bearing* и *bearing1* моделируют наработку на отказ подшипника, скрытый отказ двигателя (до диагностики) и восстановление системы.

Результат моделирования (один прогон модели) представлен на Рис.4.

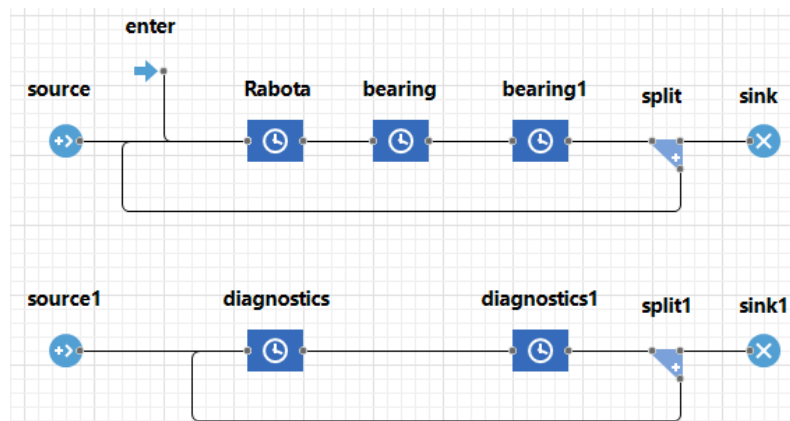


Рис.3 – Модель износа подшипника и диагностики

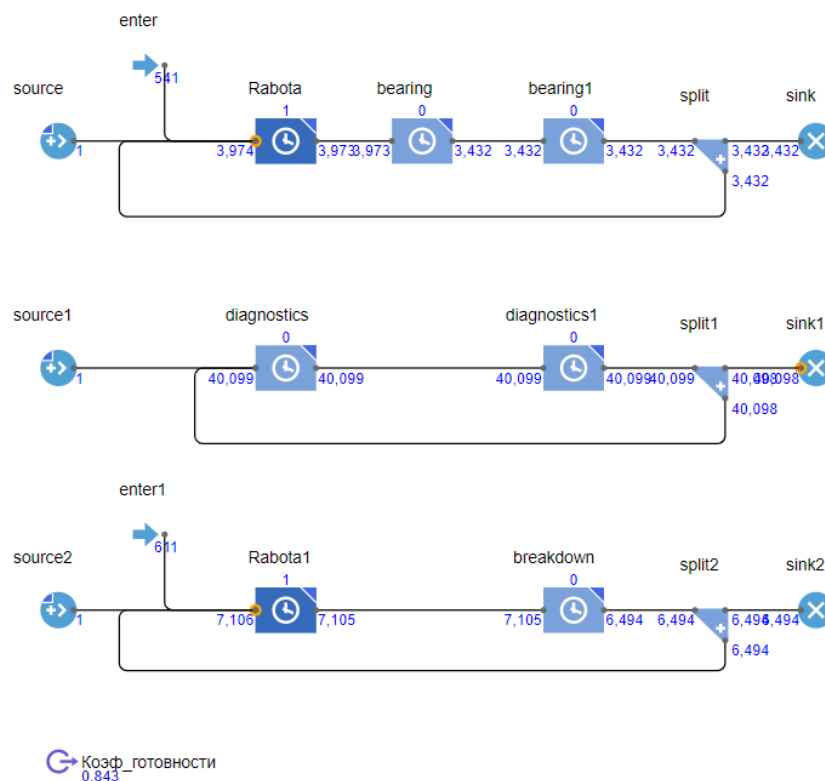


Рис.4 – Результат моделирования системы

Моделирование проводилось при следующих исходных данных. Функции распределения $F_1(t)$, $F_2(t)$, $F_3(t)$, $G_1(t)$, $G_2(t)$ и $G_3(t)$; распределены по обобщенному закону Эрланга второго порядка с параметрами:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 0,0133 \text{ ч}^{-1}, \lambda_2 = 0,04 \text{ ч}^{-1}; \mu_1 = 0,0667 \text{ ч}^{-1}, \mu_2 = 0,2 \text{ ч}^{-1}, \\ \eta_1 &= 0,00667 \text{ ч}^{-1}, \eta_2 = 0,02 \text{ ч}^{-1}, v_1 = 0,0667 \text{ ч}^{-1}, v_2 = 0,2 \text{ ч}^{-1}; \\ \gamma_1 &= 1,33 \text{ ч}^{-1}, \gamma_2 = 4,0 \text{ ч}^{-1}, \omega_1 = 0,667 \text{ ч}^{-1}, \omega_2 = 2,0 \text{ ч}^{-1}. \end{aligned}$$

Результаты имитационного и аналитического моделирования ($KГ_{им}$ – коэффициент готовности по результатам имитационного моделирования, $KГ_{им.ср}$ – среднее значение коэффициента готовности по 20 экспериментам)

в имитационной модели, $KГ_{ан}$ – коэффициент готовности по результатам аналитического моделирования) приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты моделирования

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$KГ_{им}$	0,844	0,843	0,844	0,843	0,844	0,843	0,842	0,847	0,846	0,841
№	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$KГ_{им}$	0,844	0,844	0,847	0,843	0,84	0,845	0,841	0,842	0,845	0,841
$KГ_{им.ср}$	0,843									
$KГ_{ан}$	0,839									
Отн. погр.	0,53%									

Как видно из Таблицы 1, относительная погрешность результатов моделирования составила 0,53%, что явно говорит о правильности построения аналитической и имитационной моделей.

Проведенное исследование позволяет не только подтвердить корректность разработанной модели, но и оптимизировать ее параметры перед переходом к этапу практической реализации. Полученные результаты демонстрируют эффективность предложенного подхода к верификации моделей технических систем с учетом факторов надежности.

Использованный метод сочетает преимущества аналитического и имитационного моделирования, обеспечивая комплексную верификацию при различных сценариях работы системы. Интеграция этих методов в единой инструментальной среде AnyLogic значительно повышает достоверность получаемых результатов.

Библиографический список.

1. Боев В.Д. Моделирование систем. Инструментальные средства GPSS World. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004 – 368 с.
2. Советов Б.Я. Моделирование систем: Курсовое проектирование: Учеб. пособие для вузов по спец. АСУ [Текст] / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – М.: Высш. шк., 1988. – 135 с.
3. Томашевский В.Н. Имитационное моделирование в среде GPSS [Текст] / В.Н. Томашевский, Е.Г. Жданова. – М.: Бестселлер, 2003. – 416 с.
4. Загорёнов М.В., Копп В.Я., Чаленков Н.И. Анализ функционирования системы с учетом отказов и резерва энергетической системы. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Тула. Изд-во ТулГУ. 2023. – № 3. – С. 95-100.
5. Шрайбер Т.Дж. Моделирование на GPSS [Текст] / Т.Дж. Шрайбер ; [пер. с англ. В.И. Гарчера, И.Л. Шмуйловича]; под ред. М.А. Файнберг. – М.: Машиностроение, 1980. – 592 с.
6. GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем / Кудрявцев Е.М. ДМК, Пресс 2004, 5-94074-219-X.

7. Боев В.Д. Исследование адекватности GPSS World и AnyLogic при моделировании дискретно-событийных процессов: Монография / В.Д. Боев. – СПб.: ВАС, 2011. – 404 с.
8. Дискретно-событийное моделирование. [Электронный ресурс] // AnyLogic. – URL: <http://www.anylogic.ru/discrete-event-simulation>.
9. Борщёв А.В. От системной динамики и традиционного ИМ – к практическим агентным моделям: причины, технология, инструменты // <http://www.gpss.ru/paper/borshevarc.pdf>.
10. Кудрявцев Е.М. Основы имитационного моделирования различных систем. / Е.М. Кудрявцев. – М.: ДМК пресс, 2004. – 320 с.
11. Многоподходное имитационное моделирование в AnyLogic. XJ Technologies : [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://www.xjtek.ru>

¹*Заморёнов Михаил Вадимович, канд. техн. наук, доц., доцент, mvzamoryonov@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

²*Моисеев Дмитрий Владимирович, д-р техн. наук, доц., зав. кафедрой, dvmoiseev@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

³*Малицкая Александра Александровна, старший преподаватель, malitskaya@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

⁴*Ченгарь Ольга Васильевна, канд. техн. наук, доц., доцент, ovchengar@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

Zamoryonov Mikhail Vadimovich, Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor, mvzamoryonov@mail.sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Moiseev Dmitry Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Docent, Head of Department, dvmoiseev@mail.sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Malitskaya Alexandra Alexandrovna, Senior Lecturer, malitskaya@mail.sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Chengar Olga Vasilevna, Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor, ovchengar@mail.sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

ИЗМЕРЕНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТУЛИЕВОГО ВОЛОКОННОГО ЛИТОТРИПТЕРА НА ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ДРОБЛЕНИЯ КАМНЕЙ МОЧЕТОЧНИКА

Чернега В.С.¹, Арбузов И. А.², Лушина В.С.³, Еременко С.А.⁴

MEASUREMENT AND MODELING OF THE INFLUENCE OF THULIUM FIBER LITHOTRIPTER PARAMETERS ON THE DURATION OF URETERAL STONE FRAGMENTATION

Chernega V.S.¹, Arbuzov I.A.², Lushina V.S.³, Eremenko S.A.⁴

Аннотация. Описан способ измерения длительности дробления мочевого камня при контактной лазерной литотрипсии, основанный на измерении суммарной энергии, затраченной на дробление камня и частоты, и энергии лазерных импульсов, а также приведены данные измерений времени дробления тулиевым волоконным лазером в клинических условиях. Обоснована целесообразность использования при оценке эффективности дробления использовать вместо скорости дробления величину удельной потери массы камня на единицу энергии импульса. Экспериментально определено, что среднее значение удельной потери массы камня на 1 джоуль энергии составляет $0,291 \pm 0,015$ мг/Дж при использовании режима «Фрагментация» и $0,068 \pm 0,017$ мг/Дж при использовании режима «Распыление». Приведены результаты моделирования процесса длительности дробления мочевого камня при варьировании энергии и частоты импульсов.

Abstract. The article describes a method for measuring the duration of urinary stone fragmentation in contact laser lithotripsy based on measuring the total energy spent on stone fragmentation and the frequency and energy of laser pulses, and also provides data on the fragmentation time measured with a thulium fiber laser in clinical conditions. The expediency of using the specific stone mass loss per unit of pulse energy instead of the fragmentation rate when assessing the fragmentation efficiency is substantiated. It has been experimentally determined that the average value of the specific stone mass loss per 1 joule of energy is 0.291 ± 0.015 mg/J when using the Fragmentation mode and 0.068 ± 0.017 mg/J when using the Dusting mode. The results of modeling the duration of urinary stone fragmentation with varying pulse energy and frequency are presented.

Ключевые слова. Лазеры в медицине, контактная лазерная литотрипсия, длительность дробления, параметры лазерных импульсов.

Keywords. Lasers in medicine, contact laser lithotripsy, fragmentation duration, laser pulse parameters.

Введение. Лазерные технологии широко используются медиками в клинической практике для лечения и профилактики различных заболеваний. Одним из перспективных медицинских направлений для применения лазерных методов является урология, в которой квантовые генераторы используются для резекции и абляции тканей, а также для лечения мочекаменной болезни (МКБ) методом их дробления (литотрипсии). Процесс контактной лазерной литотрипсии выполняется путем ввода через уретру тонкого оптического зонда до его контакта с мочевым камнем и подачи по оптическому волокну импульсов от квантового генератора. Под действием этих импульсов происходит разрушение камня на мелкие фракции (песок), которые затем самостоятельно выводятся с током мочи.

До недавнего времени для дробления (литотрипсии) мочевых конкрементов широко применялись литотриптеры, построенные на основе твердотельного гольмиевого лазера с длиной волны излучаемых колебаний 2100 нм. [1,2]. В настоящее время на смену им пришли более безопасные и экономичные литотриптеры, созданные на базе тулиевых волоконных лазеров с длиной волны излучаемых колебаний 1940 нм. Выполнение литотрипсии при длине волны 1940 нм существенно повышает качество проведения операции. Это связано с тем, что поглощение энергии инфракрасных колебаний при такой длине волны в 4,5 раза выше, чем у гольмиевого лазера. Конструктивные и электрические параметры тулиевых лазеров оказывают существенное влияние на клинические характеристики процесса лечения урологических заболеваний [3,4].

Одним из важнейших клинических параметров, характеризующий процесс дробления мочевых конкрементов под воздействием лазерных импульсов, является длительность дробления камней, от которой зависит безопасность лечения, в частности, вероятность возникновения интра- и постоперационных осложнений, влияющих на качество жизни пациента [5].

Целью настоящей работы является исследование зависимости длительности дробления мочевых камней от энергии и частоты следования импульсов тулиевого литотриптера и обоснование граничных значений этих параметров.

Измерение и результаты моделирования.

В настоящее время в лечебных заведениях Российской Федерации для дробления мочевых конкрементов применяются преимущественно отечественные тулиевые волоконные лазерные литотриптеры типа FiberLase U2 и U3 производства НПО «ИРЭ Полус», реже – литотриптеры зарубежных производителей. Основные параметры всех этих устройств практически совпадают (Таблица 1).

Параметрами, которые может варьировать хирург вовремя литотрипсии, являются энергия и частота следования импульсов. Некоторые литотриптеры имеют возможность изменять и длительность

излучаемых импульсов. Промышленные тулиевые волоконные литотриптеры могут генерировать импульсные оптические колебания с длиной волны 1940 нм с энергией от 0,025 до 8 Джоулей и частотой следования импульсов от единиц герц до 2500 Гц.

Таблица 1 – Значения параметров лазерных литотриптеров

Тип лазерного аппарата	Параметры лазерного аппарата		
	Средняя/ пиковая мощность, Вт	Энергия импульса, Дж	Частота импульсов, Гц
FiberLase U1(Россия) НПО «ИРЭ Полюс»	120/120	0,03-8	до 2 200
FiberLase U2 (Россия) НПО «ИРЭ Полюс»	40/400	0,025-6	до 1 600
FiberLase U3 (Россия) НПО «ИРЭ Полюс»	60/500	0,025-6	до 2 400
UROLASE ООО «ВПГ ЛАЗЕРУАН»	40	0,02-6	200
Lithotripsy laser (КНР)	60	0,02-6	до 2 500
TLR 110-1908 IPG Photonics (США)	50	0,03-10	до 1 000
SOLTIVE™ Premium Olympus (США)	60	0,025-6	до 2 400

Дробление мочевых камней может осуществляться в трех режимах, которые отличаются диапазонами энергий E_i и частот F_i следования лазерных импульсов:

- фрагментация конкрементов ($E_i = 0,6-2,0$ Дж и $F_i = 6-10$ Гц);
- распыление ($E_i = 0,05-0,5$ Дж и $F_i = 20-100$ Гц);
- попкорнинг ($E_i = 0,02-0,2$ Дж и $F_i = 100-150$ Гц).

При этом возможно в процессе выполнения операции комбинирование режимов, например, сначала выполняется дробление камня на относительно крупные фрагменты в режиме «Фрагментация», затем превращение фрагментов камня в мелкодисперсионную пыль в режиме «Распыление» и «Попкорнинг».

Оценка длительности дробления (длительности лазерного излучения) осуществлялась на основе следующих соотношений.

Для полного разрушения камня, при котором остаются фрагменты диаметром не более 1 мм, (выводятся самостоятельно в процессе тока физиологической жидкости) затрачивается суммарная энергия лазерного излучения E_{sum} , вычисляемая по следующей формуле:

$$E_{sum} = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N E_{i_{kn}}, \quad (1)$$

где $E_{i_{kn}}$ – энергия n -го импульса, излучаемого лазером в процессе дробления при k -м режиме дробления; K – количество режимов работы литотриптера во время операции; N – общее количество импульсов, воздействующих в процессе дробления на конкремент при k -м режиме дробления.

В связи с тем, что энергия импульсов при определенном режиме остается постоянной, формулу (1) при использовании только одного режима можно представить следующим образом:

$$E_{sum} = N \cdot E_i = F_i \cdot T_L \cdot E_i,$$

где F_i – частота следования импульсов (Гц); T_L – длительность работы лазера, при котором излучаемые импульсы воздействуют на мочевого конкремент и приводят к его разрушению (с).

Отсюда

$$T_L = \frac{E_{sum}}{E_i \cdot F_i} = \frac{E_{sum}}{Pa},$$

где Pa – средняя мощность излучения литотриптера.

Если в процессе операции применяется несколько режимов дробления, то итоговая длительность литотрипсии определяется путем суммирования длительностей дроблений, вычисленных при каждом режиме работы литотриптера. В Таблице 2 приведены часть данных измерений длительности литотрипсии, при дроблении камней мочеочника в режиме «Фрагментация», полученных авторами в клинических условиях.

Таблица 2 – Длительность литотрипсии при дроблении камней мочеочника в режиме «Фрагментация» различных значениях параметров камня лазерных импульсов

Масса камня, мг	Средняя плотность, НУ	Энергия импульсов, Дж	Частота импульсов, Гц	Длительность литотрипсии, с	Скорость абляции R, мг/с
404	1 035	1,5	6,7	144,4	2,8
133	1 180	1,5	8,0	50,3	2,64
163	650	1,5	10	51,7	3,15
768	1 300	1,5	6,7	130	5,9

Масса камня рассчитывалась до начала операции на основе его объема и физической плотности. Объем камня V определялся по

результатам компьютерной томографии (при их наличии этого показателя), либо вычислялся по формуле, рекомендуемой Европейской ассоциацией урологов по формуле:

$$V = l \times w \times d \times \pi \times 0,167,$$

где l , w и d – длина, ширина и толщина камня соответственно, измеренные при компьютерной томографии или проведении трехмерных ультразвуковых исследований (УЗИ); $\pi = 3,14159$.

Масса камня рассчитывалась как произведение объема камня V на его среднюю физическую плотность ρ . Физическая плотность конкремента вычислялась на основе рентгенологической по формуле [9]:

$$\rho = 1,539 + 0,000485 \times HU [г / см^3],$$

где HU – средняя рентгенологическая плотность камня в единицах Хаунсфилда, получаемая в процессе компьютерной томографии, средние значения которой приведены во втором столбце Таблицы 2.

Длительностью дробления мочевого конкремента зависит от скорости дробления (скорости абляции) Ra . Поэтому российские и зарубежные урологи для оценки эффективности тулиевой литотрипсии используют параметр Ra , измеряемой величиной потери массы конкремента за одну секунду [6...8]. Однако на наш взгляд применять такой показатель для сравнения эффективности процедуры лазерной литотрипсии не корректно, так как скорость абляции является функцией геометрических размеров и плотности камня (см. последний столбец Таблицы 2).

Для получения инвариантной оценки скорости абляции от параметров лазерного излучения проноормируем показатель скорости относительно энергии и частоты импульсов. После ряда простых преобразований формула принимает вид:

$$\gamma = \frac{Ra}{Ei \cdot Fi} = \frac{m}{T_L \cdot Ei \cdot Fi} = \frac{m}{T_L \cdot Pa} = \frac{m}{E_{sum}} [мг / Дж], \quad (2)$$

где m – масса конкремента в мг.

Показатель γ представляет собой удельную потерю массы конкремента на один джоуль энергии, который является инвариантным по отношению к параметрам лазерного излучения. В результате проведения многочисленных экспериментальных измерений в клинических условиях и на основе данных, полученных другими авторами, нами установлено, что среднее значение показателя γ является относительно стабильной величиной, зависящей от места локализации камня (мочеточник или чашечно-лоханочная система почки) и от режима дробления камня тулиевым волоконным литотриптером. Экспериментально нами получено,

что при расположении камня в мочеточнике

$\gamma = 0,291 \pm 0,015$ мг/Дж при использовании режима «Фрагментация»;
 $\gamma = 0,068 \pm 0,017$ мг/Дж при использовании режима «Распыление».

На основании формулы (2) получаем модель процесса лазерной литотрипсии, позволяющей вычислять ожидаемое время длительности дробления при различных значениях массы камня и параметров лазерного излучения [10]:

$$T_L = \frac{m}{\gamma \times Fi \times Ei} = \frac{m}{\gamma \times Pa}.$$

На Рис.1 приведены зависимости длительности дробления камня массой 1000 мг при различных значениях энергии Ei и частот Fi импульсов тулиевого волоконного литотриптера.

Как видно из Рис.1 увеличение частоты лазерных импульсов выше 60 Гц практически не приводит к уменьшению длительности дробления, однако может привести к негативным последствиям операции, в частности, к миграции камня в почку.

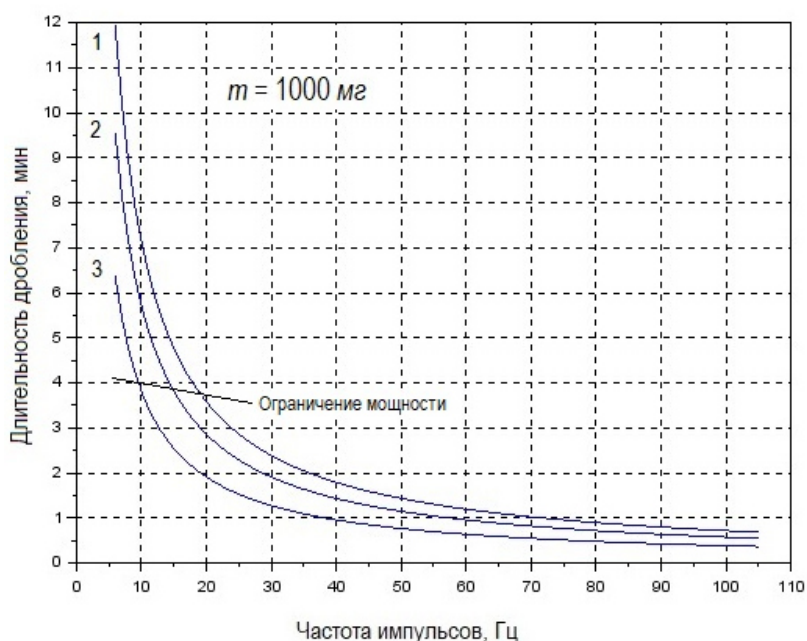


Рис.1 – Зависимость длительности дробления камня мочеточника тулиевым литотриптером в режиме «Фрагментация» при различных значениях энергии импульсов 1 – $Ei = 0,8$ Дж; 2 – $Ei = 1,0$ Дж; 3 – $Ei = 1,5$ Дж

При моделировании процесса дробления величина массы конкремента выбрана равной 1000 мг. Это позволяет легко получить время дробления при иной массе камня путем умножения времени, определенного по приведенным графикам, на реальную массу камня в миллиграммах.

На Рис.2 изображены зависимости длительности дробления в режиме «Распыление» камня мочеочника массой 1000 мг при различных значениях энергии Ei и частот Fi импульсов тулиевого волоконного литотриптера.

В работах [11,12] отмечается, что для избегания ожога слизистой оболочки мочеочника за счет нагревания орошающей жидкости, температура ее не должна быть выше 43°C. Для исключения этого явления мощность излучения не должна превышать 15 Вт при скорости орошающей жидкости 15 мл/мин. Точка пересечения графика зависимости длительности дробления с линией ограничения мощности определяет оптимальное значение времени дробления камня мочеочника тулиевым волоконным лазером.

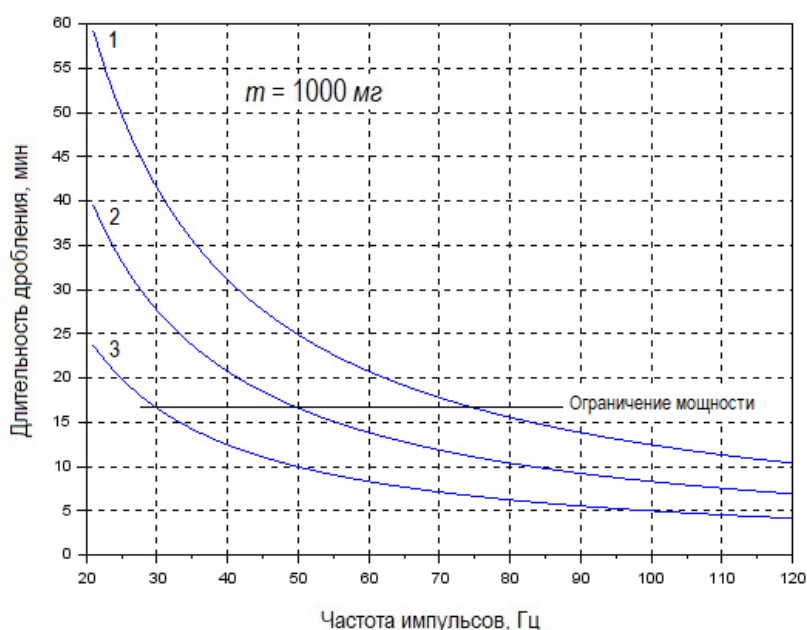


Рис.2 – Зависимость длительности дробления камня мочеочника тулиевым литотриптером в режиме «Распыления» при различных значениях энергии импульсов 1 – $Ei = 0,2$ Дж; 2 – $Ei = 0,3$ Дж; 3 – $Ei = 0,5$ Дж

Оптимальное время дробления можно уменьшить путем повышения мощности излучения до 20 Вт, однако это допускается только при увеличении скорости орошения до 25 мл/мин при которой температура охлаждающей жидкости не превышает 43°C. На Рис.1,2 проведены линии ограничения мощности на уровне 15 Вт. Линия ограничения мощности на уровне 20 Вт лежит несколько ниже и на рисунках не показана.

Приведенные результаты моделирования получены при идеальных условиях. На практике на время дробления получается больше идеального, так как на его величину оказывает влияние опыт и умение хирурга, проводящего операцию удаления мочевого конкремента, а также длительность «стояния» камня в мочеочнике и анатомические

особенности мочевыделительной системы, затрудняющие доступ к камню и попаданию на него импульсов лазера.

Заключение. Описанный способ косвенного измерения длительности контактной лазерной литотрипсии отличается простотой и высокой точностью. Приведены данные измерения авторами в клинических условиях длительностей контактной тулиево-волоконной литотрипсии и скорости потери массы мочевых конкрементов. Показано, что более объективной оценкой эффективности контактной лазерной литотрипсии является показатель удельной потери массы конкремента на 1 джоуль энергии.

Получено математическое выражение, позволяющее моделировать влияние параметров лазерного излучения на длительность дробления мочевых конкрементов, а также нормированные графические зависимости длительности дробления от частоты лазерных импульсов при дроблении с использованием режимов «Фрагментация» и «Распыление».

В дальнейших исследованиях предполагается изучить влияние на длительность дробления опыта хирурга и анатомических особенностей мочевыделительной системы больного.

Библиографический список.

1. Leijte JA. Holmium laser lithotripsy for ureteral calculi: predictive factors for complications and success/JA. Leijte, JR. Oddens, TM. Lock//J. Endourol. 2008. Vol.22(2). – P. 257-60. doi: 10.1089/end.2007.0299.
2. Чернега В.С. Особенности использования твердотельных лазеров при лечении мочекаменной болезни / В.С. Чернега, А.Н. Еременко // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2020. – Т.3. №3. – С. 287-295.
3. Kronenberg P. The laser of the future: reality and expectations about the new thulium fiber laser – a systematic review / P. Kronenberg, O. Traxer // Transl. Androl. Urol. – 2019. – Vol. 8, S. 4. – P. 398-417.
4. Чернега В.С. Влияние конструктивных особенностей волоконного тулиевого лазера на клинические характеристики литотриптера / В.С. Чернега, И.А. Арбузов // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2021. – Т. 4, № 1. – С.31- 41.
5. Schuster T.G. Complications of Ureteroscopy: Analysis of Predictive Factors / T. G. Schuster, B. K. Hollenbeck, G. J. Faerber, J. S. Wolf// J. Urol. 2001. – Vol. 166 (2). – P. 538–540.
6. Глубоко П.В. Сравнительная клиническая эффективность дистанционной и контактной литотрипсии у больных МКБ / П.В. Глыбочко, Ю.Г. Аляев, В.И. Руденко и др. // Медицинский вестник Башкортостана. 2011. – Т.6. №2. – С. 36-39.
7. Blackmon R. Comparison of holmium: YAG and thulium fiber laser lithotripsy: ablation thresholds, ablation rates, and retropulsion effects / R. Blackmon, P. Irby, N. Fried // Journal of biomedical optics. 2011. – Vol. 16 (7). – P. 071403.

8. Hardy L.A. Holmium: YAG vs thulium fiber laser dusting of calcium oxalate monohydrate stones / L.A. Hardy, V. Vinnichenko, N.M. Fried // *Lasers Surg Med.* 2019. – Vol. 51 (6). – P. 522–530.
9. Кузьмичева Г.М. Методология изучения образования мочевых камней / Г.М. Кузьмичева, М.О. Антонова, В.И. Руденко, А.С. Щичко и др. // *Фундаментальные исследования.* 2012. – № 9-1. – С.193-198.
10. Арбузов И.А. Об оценке скорости абляции мочевых конкрементов тулиевым волоконным литотриптером / И. А. Арбузов, В. С. Чернега // *Вестник урологии.* 2023. – Т.11. № 4. – С. 10–15.
11. Попов С.В. Тулиевая и гольмиевая уретеролитотрипсия: оценка термического воздействия на мочеточник, путем измерения температуры ирригационной жидкости в условиях in vitro / С.В. Попов, И.Н. Орлов, Д.А. Сытник, М.М. Сулейманов и др. // *Экспериментальная и клиническая урология.* 2021. – №1. – С. 26-30,
12. Tianfu Ding. Study of Temperature Changes Around Fibres in Super Pulse Thulium Fibre Laser in Vitro Lithotripsy / Ding Tianfu, Xiao Bo1, Zeng Xue, et al. // *Urology Journal.* 2023. Vol 20 No. 2. Pp. 96-101.

¹*Чернега Виктор Степанович, канд. техн. наук, доц., доцент, v_chernega@rambler.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

²*Арбузов Игорь Анатольевич, заведующий отделением, arbuzov-007@mail.ru, Россия, Севастополь, ГБУЗ С «Городская больница №9»*

³*Лушина Виктория Сергеевна, ассистент, vsyanovskaya@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет*

⁴*Еременко Сергей Алексеевич, студент, seryivol@gmail.com, Россия, Краснодар, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет»*

Chernega Viktor Stepanovich, Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor, v_chernega@rambler.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Arbuzov Igor Anatolyevich, Head of Department, arbuzov-007@mail.ru, Russia, Sevastopol, City Hospital No. 9

Lushina Victoria Sergeevna, Assistant, vsyanovskaya@mail.sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Eremenko Sergey Alekseevich, Student, seryivol@gmail.com, Russia, Krasnodar, Kuban State Technological University

ВЕРИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ СЕЛЕКТИВНОЙ СБОРКИ ДВУХ ЭЛЕМЕНТОВ, УЧИТЫВАЮЩЕЙ ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ НА ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЦЕССА

Филипович О.В.¹

VERIFICATION OF THE MODEL OF SELECTIVE ASSEMBLY OF TWO ELEMENTS, TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF MEASUREMENT ERRORS ON THE PROCESS INDICATORS

Filipovich O.V.¹

Аннотация. Рассматривается процесс селективной сборки двух элементов. Для анализа и синтеза сборочного процесса используются метод и математическая модель, учитывающие стохастичность параметров и влияние погрешностей измерений на этап сортировки. На конкретном примере производится сравнение результатов определения показателей процесса с известной моделью, адекватность которой подтверждена данными экспериментальных исследований.

Abstract. The process of selective assembly of two elements is considered. To analyze and synthesize the assembly process, a method and a mathematical model are used, taking into account the stochasticity of parameters and the influence of measurement errors on the sorting stage. On a concrete example, the results of determining the process parameters are compared with the known model, the adequacy of which is confirmed by the data of experimental research.

Ключевые слова. Однопараметрическая селективная сборка, математическая модель, погрешность измерения, верификация.

Keywords. Single-parameter selective assembly, mathematical model, measurement error, verification.

Введение.

Селективная сборка является современным и перспективным методом обеспечения требуемого качества изделий в различных отраслях промышленности [1...5]. Ее суть состоит в изготовлении элементов по расширенным допускам на параметры x_i ($i = \overline{1, m}$), по которым в дальнейшем происходит сборка, и рациональном подборе комплектующих по заданным алгоритмам для образования выходного параметра изделия, зависимость которого от входных известна

$$y = g(x_1, x_2, \dots, x_m). \quad (1)$$

Структуру процесса можно представить, как многомерную систему,

в которой на вход каждого этапа поступают, а с выхода – снимаются определенные данные, при этом изменения происходят под действием различных факторов. Особенностью сборочного процесса является их последовательное выполнение, а также наследование, заключающееся в переносе свойств объектов от предшествующих этапов к последующим.

Обязательным этапом селективной сборки является измерение, в процессе которого выявляются действительные значения параметров z_i ($i = \overline{1, m}$), которые в случае аддитивной модели наблюдений будут определяться выражениями вида [6,7]

$$z_i = x_i + \delta_i,$$

где δ_i – случайная составляющая погрешности измерения i -го параметра.

Следующим этапом является сортировка на селективные группы, которую осуществляют по значениям z_i . В [8...10] предложен метод и разработаны математические модели, учитывающие влияние погрешностей измерения на результаты сортировки. Метод применяется при одно- и многовариантной сборке m элементов, известном уравнении комплектования и линейной зависимости «вход-выход» (1). Он позволяет определить вероятности получения сборочных комплектов при любых комбинациях образующих его элементов и способах формирования комплектов с учетом показателей качества селективно собираемых однопараметрических изделий. В качестве этих показателей рассматриваются [11]:

- собираемость сборочных комплектов P_1 , т.е. доля годных комплектов в их общем числе, полученных в силу принятых правил комплектования;

- выход годных из исходной совокупности элементов, не прошедших сортировку (P_0).

Целью данной работы является верификация предложенного метода путем сравнения результатов определения показателей сборочного процесса с известной (базовой) моделью при двухэлементной однопараметрической сборке.

Моделирование однопараметрической селективной сборки двух элементов.

Одним из вариантов осуществления процедуры верификации метода моделирования, реализованного в виде компьютерной модели, является сравнение с результатами достоверной математической модели [12]. Такая модель построена в [11], ее адекватность неоднократно подтверждалась данными экспериментальных исследований. Однако, она не учитывает стохастические возмущения, воздействующие на сборочный процесс, в частности, ограниченную точность измерений, что приводит к ошибкам сортировки. Здесь предлагается на одном примере оценить сходимость

результатов моделирования при уменьшении практически до нуля случайных составляющих погрешностей измерений.

Два элемента с параметрами x_i ($i=\overline{1,2}$) сопрягаются по схеме, изображенной на Рис.1.а; диаграмма сопряжений показана на Рис.1.б. Правило комплектования – одновариантное, т.е. элементы из определенных селективных групп могут попасть в сборочный комплект (СК) только одного типа.

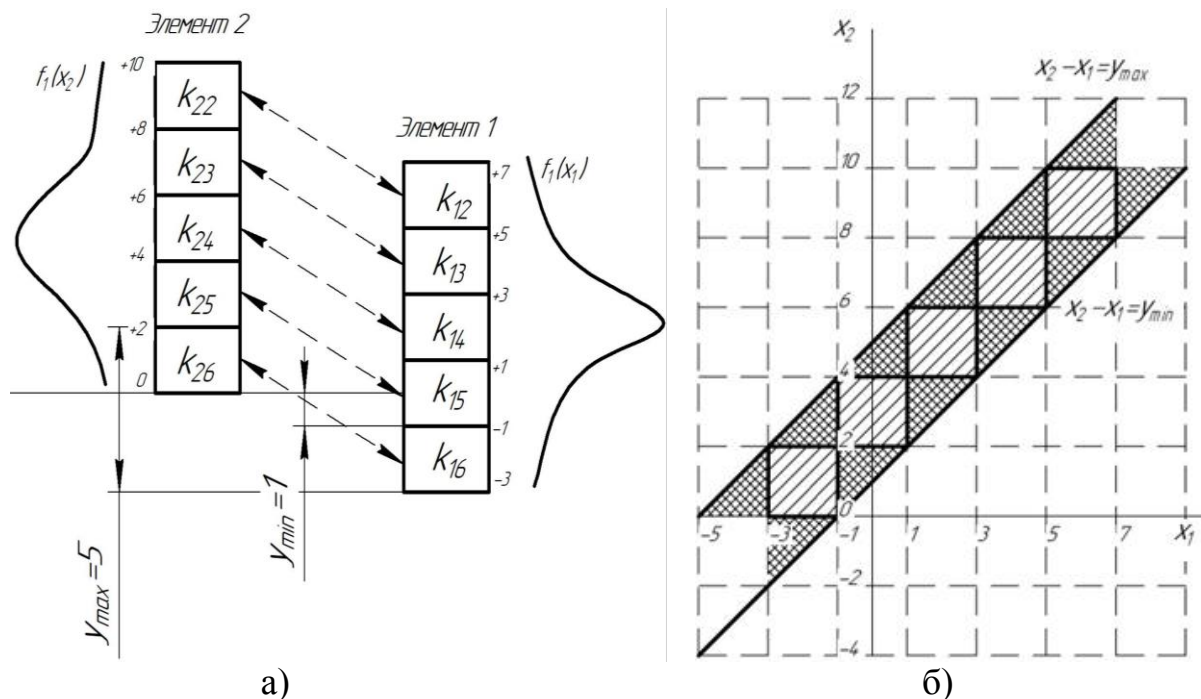


Рис.1 – Схема расположения интервалов допусков (а) и диаграмма сопряжений (б)

Полагаем, что распределения $f_{li}(x_i)$ случайных величин x_i – гауссовские, имеющие параметры m_{x_i} и σ_{x_i} (математические ожидания и среднеквадратические отклонения).

Область допустимых значений выходного параметра на Рис.1.а ограничена двумя линиями, определенными его предельными значениями:

$$y_{\min} \leq x_2 - x_1 \leq y_{\max},$$

при этом $y_{\min} = 1$, $y_{\max} = 5$.

Исходные данные (приведены в условных единицах):

- величина расширенного допуска $Tx_1 = Tx_2 = 10$ с координатами середин интервалов +2 и +5. Общее количество селективных групп $l_1 = l_2 = 7$, интервалы групповых допусков $Tx_i^{(k_i)}$ равны между собой;
- математические ожидания $m_{x1} = 1,5$; $m_{x2} = 5,5$;
- среднеквадратические отклонения $\sigma_{x1} = 1,64$; $\sigma_{x2} = 1,64$;

– количество частей, на которые разделяются интервалы групповых допусков $n_i = 20$ ($i = \overline{1,2}$);

– математические ожидания $m_{\delta i} = 0$ ($i = \overline{1,2}$).

Для определения соотношений групповых допусков и пределов допускаемых погрешностей измерения $\Delta_{\lim i}$, а также этих пределов и среднеквадратических отклонений погрешностей $\sigma_{\delta i}$, введем коэффициенты

$$c_{xi} = \frac{Tx_i^{(k_i)}}{\Delta_{\lim i}}, \quad i = \overline{1,2}, \quad c_{\Delta i} = \frac{\Delta_{\lim i}}{\sigma_{\delta i}}, \quad i = \overline{1,2}.$$

Пределы допускаемых погрешностей измерения варьировались относительно групповых допусков путем изменения коэффициентов c_x . Исследования проводились для трех законов распределения $f_{2i}(\delta_i)$ случайных составляющих погрешностей (нормальный, равномерный, равнобедренного треугольника).

Базовая модель, построенная в [11], позволяет определить вероятность образования сборочных комплектов $I_{СК}$ без учета их качества. Для приведенных выше исходных данных она равна 0,799.

Разработанный метод и построенная на его базе математическая модель позволяет вычислить один из основных показателей сборочного процесса P_0 – количество годных сборочных комплектов с учетом ошибок сортировки. Результаты определения показателя P_0 сведены в Таблицу 1 и графически представлены на Рис.2.

Таблица 1 – Результаты определения вероятностей P_0 при различных законах распределения случайных величин δ и значениях коэффициентов c_x

Нормальный закон распределения, $c_{\Delta}=2$										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	100
0,687	0,764	0,782	0,789	0,792	0,793	0,795	0,795	0,796	0,796	0,798
Нормальный закон распределения, $c_{\Delta}=3$										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	100
0,741	0,782	0,790	0,793	0,795	0,796	0,796	0,797	0,797	0,797	0,799
Равномерный закон распределения										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	100
0,659	0,754	0,777	0,786	0,790	0,792	0,793	0,794	0,795	0,796	0,798
Треугольный закон распределения										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	100
0,716	0,775	0,787	0,791	0,794	0,795	0,796	0,796	0,796	0,797	0,799

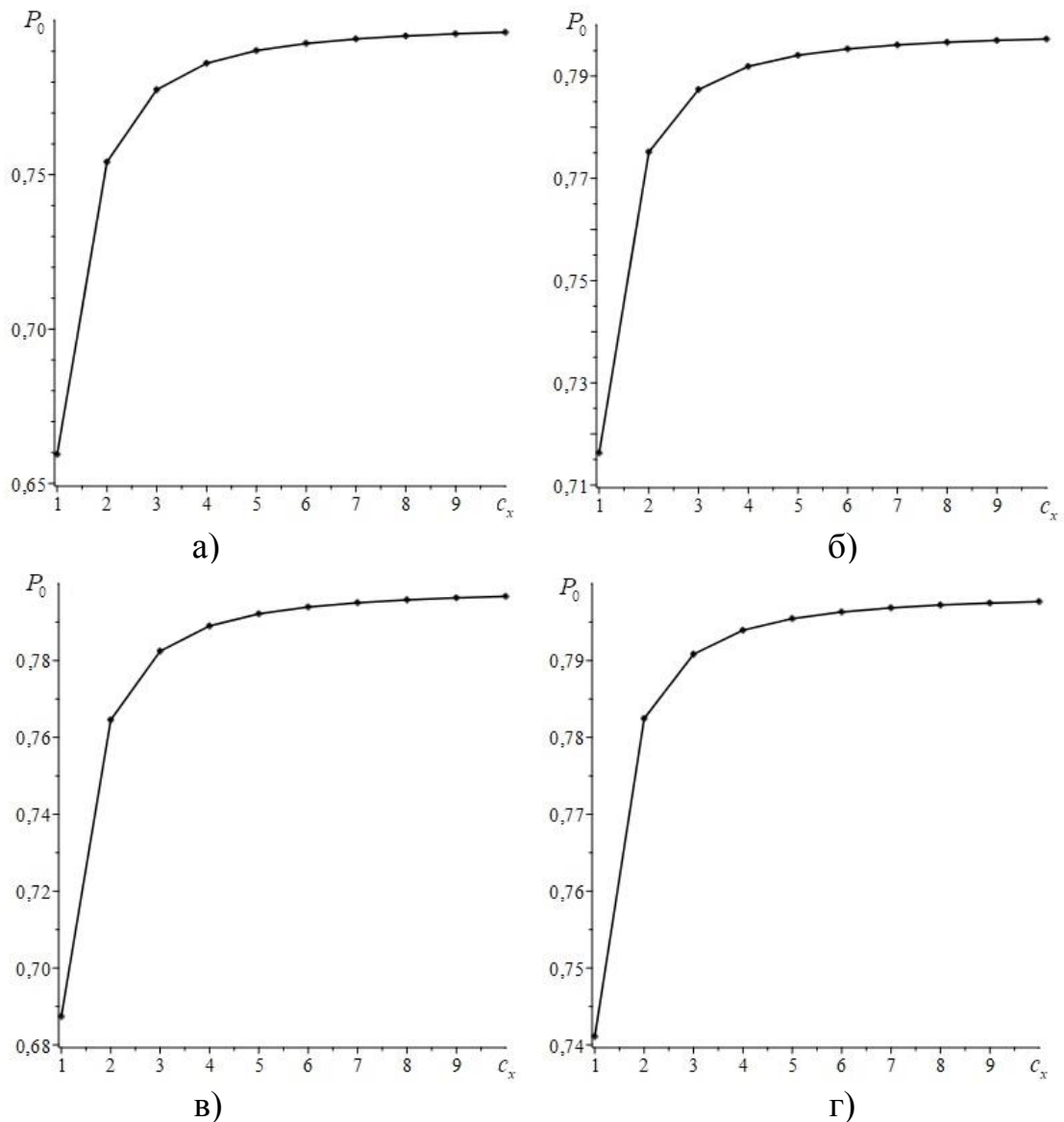


Рис.2 – Графики зависимостей $P_0 = P_0(c_x)$ при законах распределения СВ δ : а) нормальном при $c_\Delta=2$; а) нормальном при $c_\Delta=3$; в) равной вероятности; г) Симпсона

Закключение. Представленные в Таблице 1 и на Рис.2 результаты показывают, что при значительном уменьшении величины погрешности измерения имеют место малые расхождения величин P_0 , вычисленных с использованием разработанного метода, и вероятности $I_{СК}$, определенной по базовой модели. Это позволяет сделать вывод о достоверности применяемых методов моделирования. Дополнительно следует отметить, что выходные показатели сборочного процесса в значительной степени зависят от законов распределения случайных величин, используемых в стохастических моделях, что подчеркивает актуальность их обоснованного выбора.

Библиографический список.

1. Pugh G.A. Partitioning for selective assembly / G.A. Pugh // Comput. Ind. Eng., 1986. – 11(1–4). – PP. 175-179.
2. Mansoor E.M. Selective assembly: its analysis and applications / E.M. Mansoor // Int. J. Prod. Res., 1961. – 1(1). – PP. 13-24.
3. Tan M.H. Generalized selective assembly / M.H. Tan, C.J. Wu // IIE Trans, 2012. – 44(1). – PP. 27-42.
4. Schmitt J. Process and performance optimization by selective assembly of battery electrodes / J. Schmitt, A. Raatz, F. Dietrich [et al.] // CIRP Ann. – Manuf. Technol., 2014. – 63. – PP. 9-12.
5. Zocher K.-P. Adaptive and selective assembling of microscope objectives / K.-P. Zocher // Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability, 2012. – PP. 376-381.
6. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.
7. Копп В.Я. Энтропийный подход к анализу метрологических характеристик измерительных приборов в машино- приборостроении / В.Я. Копп, А.И. Балакин, А.А. Скидан [и др.]. – Севастополь: Крымский Издательский Дом, 2020. – 340 с.
8. Filipovich O. Method for taking into account measurement errors when sorting elements into selective groups / O. Filipovich, G. Nevar, N. Balakina, etc. // International Russian Automation Conference (RusAutoCon 2023): Advances in Automation V, 2024. – PP. 174-182. – DOI: 10.1007/978-3-031-51127-1_17.
9. Филипович О.В. Модель процесса одновариантной однопараметрической селективной сборки двух элементов с учетом погрешностей измерения при их сортировке / О.В. Филипович // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. – 2023. – №3(23). – С. 93-101. – EDN TLIXMR.
10. Филипович О.В. Методы моделирования процессов однопараметрической многоэлементной селективной сборки / О.В. Филипович // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении, 2025. – №2(30). – С. 44-50.
11. Катковник В.Я. Основы теории селективной сборки / В.Я. Катковник, А.И. Савченко. – Л.: Политехника, 1991. – 303 с.
12. Сальников А.В. Верификация и валидация компьютерных моделей / А.В. Сальников, М.С. Французов, К.А. Виноградов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2022. – №9(750). – С. 100-115. – DOI 10.18698/0536-1044-2022-9-100-115.

¹Филипович Олег Викторович, канд. техн. наук, доц., доцент, ophis1@yandex.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

Filipovich Oleg Viktorovich, Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor, ophis1@yandex.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

ОСНОВЫ И НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ С ЦИФРОВЫМ ОСЦИЛЛОГРАФОМ

Волобуев К.А.¹, Москалева В.М.², Трубин И.В.³, Трубин В.Г.⁴

BASICS AND SOME FEATURES OF WORKING WITH A DIGITAL OSCILLOSCOPE

Volobuev K.A.¹, Moskaleva V.M.², Trubin I.V.³, Trubin V.G.⁴

Аннотация. Неотъемлимой частью научно-исследовательской деятельности является проблема измерения и анализа различных сигналов. Часто для визуального анализа сигналов применяются специализированные инструменты – осциллографы. Эти устройства дают возможность наблюдать за изменением формы сигнала с течением времени. Рассматриваются основы и некоторые особенности работы с цифровым осциллографом, которые могут быть неочевидны как для начинающих, так и для опытных пользователей. Рассказывается о параметрах, влияющих на работу осциллографа. Также приводится базовая информация о заземлении и рассматриваются различные варианты гальванической развязки приборов. Статья полезна студентам, научным сотрудникам, инженерам, аспирантам, желающим подробнее узнать о некоторых технических особенностях работы с цифровыми осциллографами.

Abstract. An integral part of scientific research is the problem of measuring and analyzing various signals. Often, specialized tools - oscilloscopes - are used for visual analysis of signals. These devices make it possible to observe changes in the shape of a signal over time. The article discusses the basics and some features of working with a digital oscilloscope, which may not be obvious to both beginners and experienced users. It describes the parameters that affect the operation of the oscilloscope. It also provides basic information on grounding and discusses various options for galvanic isolation of devices. The article is useful for students, researchers, engineers, and graduate students who want to learn more about some technical features of working with digital oscilloscopes.

Ключевые слова. Цифровой осциллограф, щупы осциллографа, переменная/постоянная составляющие, заземление, изолированные и неизолированные каналы, гальваническая развязка, трансформаторная гальваническая развязка, батарейное питание.

Keywords. Digital oscilloscope, oscilloscope probes, AC/DC component, grounding, isolated and non-isolated channels, galvanic isolation, transformer galvanic isolation, battery power.

Введение.

При проведении научно-исследовательских работ, связанных с измерением физических величин и разработкой электронных устройств

достаточно часто возникает необходимость посмотреть форму того или иного сигнала (при этом часто важно не только само значение, но и как оно изменяется во времени). Например, требуется увидеть период и заполнение импульсного сигнала, оценить пульсации блока питания и т.п. Для решения подобных задач используют осциллографы. Однако при проведении измерений данными устройствами, необходимо учитывать ряд особенностей, которые недостаточно подробно освещены и могут показаться неочевидными как для начинающих, так и для опытных пользователей.

Целью данной работы является частичная систематизация знаний и исследование некоторых особенностей измерений с помощью цифрового осциллографа. На примере осциллографа OWON SDS1102 рассмотрены некоторые явления, с которыми можно столкнуться при настройке делителей осциллографа, компенсации параметров щупов, одновременном использовании нескольких каналов осциллографа, а также подключение заземления и использование гальванической развязки.

Описание всех функций и характеристик осциллографа можно узнать из документации на конкретную модель. Далее в статье будет приведена информация, которая полезна для базового понимания принципов работы с осциллографами.

Настройка делителей.

Для работы с разными диапазонами напряжения на большинстве измерительных щупов установлен ползунковый переключатель делителя, а в меню осциллографа имеется специализированная настройка для множителя. При работе с осциллографом важно помнить, что для правильного отображения формы сигнала, режим делителя на щупе должен соответствовать режиму делителя, выбранному в меню осциллографа.

Осциллограф принимает измеренное напряжение, а затем умножает его на значение, выставленное в меню. Если режим, установленный на щупе, не совпадает с настройкой, выбранной в меню осциллографа, то сигнал по оси времени будет отображаться верно, а по оси напряжения – значения не будут соответствовать действительности. При частом переключении делителей может износиться ползунковый переключатель, из-за чего возникает «дребезг контактов».

Помимо щупов, идущих в комплекте с осциллографом, с делителями 1:1 и 1:10, существуют щупы с делителями – 1:100 и 1:1000. Щупы с такими большими делителями предназначены для измерения напряжений, которые на порядки превышают максимальное входное напряжение канала осциллографа. Такие высокие напряжения являются опасными для человека и требуют особого внимания к технике безопасности.

Компенсация параметров щупов.

При первом включении осциллографа или замене щупов, необходимо выполнить их регулировку. Как выполнять регулировку указано в документации к осциллографу. При использовании щупов, идущих в комплекте (имеющих переключатель 1:1 и 1:10) стоит также обратить внимание, в каком режиме они должны быть установлены для

регулировки. К примеру, регулировку щупов осциллографа OWON SDS1102 необходимо производить в режиме 1:10 [1]. У других осциллографов могут быть иные требования к проведению регулировки.

Подключение осциллографа к измеряемой схеме.

При проведении исследовательских работ с электронным оборудованием рекомендуется:

- 1) на осциллографе настроить необходимые параметры измерения;
- 2) к отключенному от сети питания исследуемому прибору подключить «крокодилы» и щупы осциллографа;
- 3) включить исследуемое устройство;
- 4) провести необходимый анализ.

При необходимости смены места подключения «крокодилов» и щупов, рекомендуется отключить питание исследуемого устройства, отсоединить щупы и «крокодилы», после чего – повторить описанный выше алгоритм.

Приведённые рекомендации представлены, чтобы исключить вероятность случайных замыканий при подключении и отключении щупов осциллографа во время работы исследуемого устройства («на горячую»). Пренебрежение данными рекомендациями привело к выходу из строя большого количества измеряемых и измерительных устройств.

Влияние щупов на измерения.

В большинстве случаев осциллограф не стоит использовать именно как измерительный прибор, стоит понимать, что его основная задача – отображение формы сигнала.

На Рис.1 и Рис.2 отображена упрощённая схематехника щупа и входа осциллографа соответственно. Как можно заметить, щуп представляет собой не просто проводник, он имеет специально подобранные сопротивления и ёмкости, влияние которых описывается в статье [2]. Поэтому не рекомендуется заменять специализированные щупы обычными проводниками.

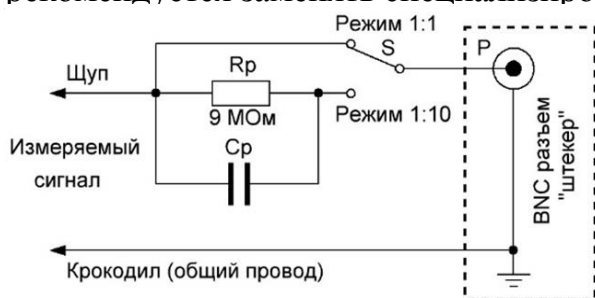


Рис.1 – Упрощённая схематехника щупа

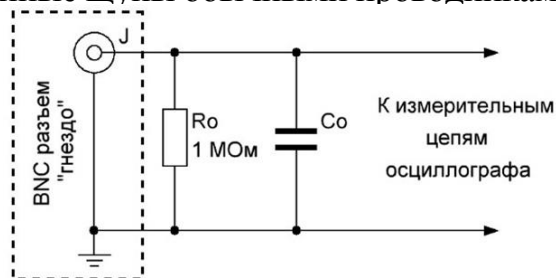


Рис.2 – Упрощённая схематехника входа осциллографа

Как видно из рисунков, в режиме переключателя 1:10 щуп имеет внутреннее сопротивление и вместе со входным сопротивлением осциллографа образует делитель напряжения. Тем самым, погрешность резисторов в делителе напряжения является причиной дополнительной погрешности при измерении щупами в режиме 1:10.

В режиме 1:1 сопротивлением щупа можно пренебречь, следовательно приложенное напряжение передаётся прямо на вход

осциллографа. Погрешность измерения в данном случае будет определяться характеристиками прибора. Входное сопротивление каналов осциллографа и сопротивление щупа указаны в документах.

На практике сопротивление щупов не является идеальным. К примеру, при измерениях мультиметром, может оказаться, что в режиме делителя 1:1 сопротивление общего провода щупа 1 Ом, а сопротивление измерительного провода щупа 270 Ом. Это связано с внутренним устройством щупа.

Стоит заметить, что осциллограф имеет достаточно сложную схемотехнику, поэтому, с большой вероятностью, корректно измерить его входное сопротивление не получится. Здесь также необходимо напомнить, что нельзя измерять сопротивление включённого электронного прибора! Это связано с тем, что мультиметр измеряет сопротивление проводника за счёт подачи на него заранее известного тока, а у включённого осциллографа по измерительным цепям также протекают токи. При взаимном воздействии устройства могут выйти из строя.

В редких случаях, когда необходимо рассчитать точность измерений осциллографа, нужно учитывать не только измерительную погрешность прибора, но и щупов. На итоговую погрешность будут влиять входной *импеданс* (сумма активного и реактивного сопротивлений) измерительного прибора и комплексное сопротивление щупа, поскольку вместе они составляют делитель напряжения. Помимо этого, так же следует учитывать, что на измерения оказывают влияние частотные характеристики.

Измерение сигналов с малой амплитудой.

При работе с осциллографом можно встретиться с шумами и помехами. Это могут быть собственные шумы блока питания осциллографа, или же внешние шумы и помехи, например от других импульсных устройств в сети, от близко расположенных проводников, от положения щупа в пространстве (щупы осциллографа являются своеобразными антеннами) и т.д.

При измерении сигналов могут возникнуть ситуации, когда амплитуда полезного сигнала сопоставима с амплитудой шумов. Щуп осциллографа может играть роль антенны, и ловить на себя наводки извне, даже без непосредственного контакта.

Использование специальной насадки – «пружинки», позволяет снизить влияние шумов, за счёт уменьшения длины проводников щупа. В большинстве случаев, данная насадка идёт в комплекте со щупами осциллографа. Важно отметить, что при её использовании необходимо отсоединить провод «крокодила». Помимо этого, использование «пружинки» рекомендуется при работе с высокочастотным сигналом для снижения влияния индуктивных искажений [2]. Фото щупа осциллографа и «пружинки» приведены на Рис.3. Как видно из Рис.3, при использовании «пружинки» заметно уменьшает длину проводника, т.к. теперь «крокодил» щупа не используется. За счёт этого количество и величина наводок также уменьшаются.

На Рис.4 приведена осциллограмма измерения сигнала при работе с «пружинкой» и без неё, масштаб 5 мВ/деление.

Режимы измерения каналов осциллографа.

Перед тем как переходить к режимам измерения осциллографа, необходимо ввести понятия постоянной и переменной составляющих сигнала.



Рис.3 – Щуп осциллографа с насадкой: «пружинка» и «крючок» соответственно

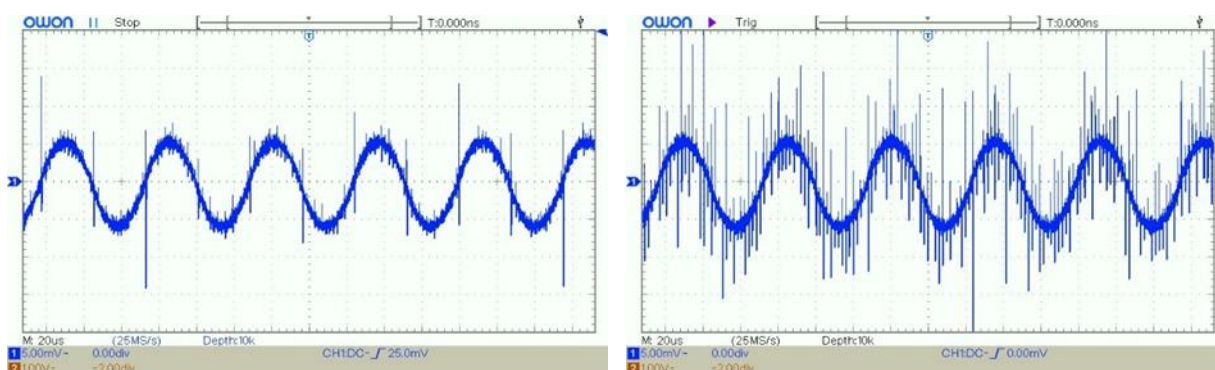


Рис.4 – Осциллограммы при использовании насадки: «пружинка» и «крючок» соответственно

Постоянная составляющая – среднее значение сигнала на рассматриваемом временном промежутке.

Переменная составляющая – разность между сигналом и его постоянной составляющей. Пример разложения входного сигнала на постоянную и переменную составляющие представлен на Рис.5.

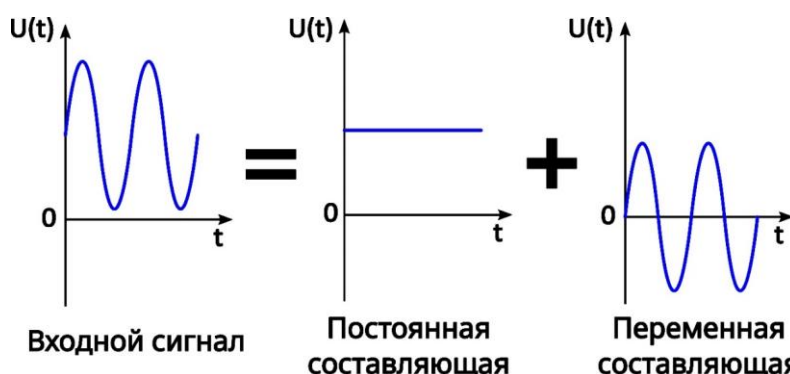


Рис.5 – Разложение входного сигнала на постоянную и переменную составляющие

Для каждого канала у осциллографа есть три режима измерения:

– DC (Direct Current) – постоянная, и переменная составляющие сигнала пропускаются в канал.

– AC (Alternating Current) – отсекается постоянная составляющая

входного сигнала.

– Ground – вход осциллографа отключается от входного сигнала.

В русскоязычных материалах могут также встречаться термины «Открытый вход» и «Закрытый вход», которые обозначают режимы DC и AC соответственно.

Режим AC удобно использовать в тех случаях, когда необходимо видеть изменения сигнала и при этом постоянная составляющая сигнала во много раз больше переменной. Примером может послужить измерение пульсаций на выходе импульсного блока питания или телефонного зарядного устройства.

Предположим, номинальное напряжение на выходе блока питания 12 В. При помощи мультиметра можно определить среднее значение напряжения, а с помощью осциллографа можно посмотреть форму сигнала на выходе и определить, амплитуду отклонений от среднего значения. В таком случае, если брать деление клетки по вертикали 2 В/дел, то будет неудобно следить за изменениями, а если брать деление клетки меньше, то сигнал вообще не будет виден из-за того, что он выйдет за предел отображения экрана. На Рис.6 приведена осциллограмма выхода блока питания с выходным напряжением 12 В для режимов измерения DC (оранжевый канал, 2 В/дел) и AC (синий канал, 200 мВ/дел).

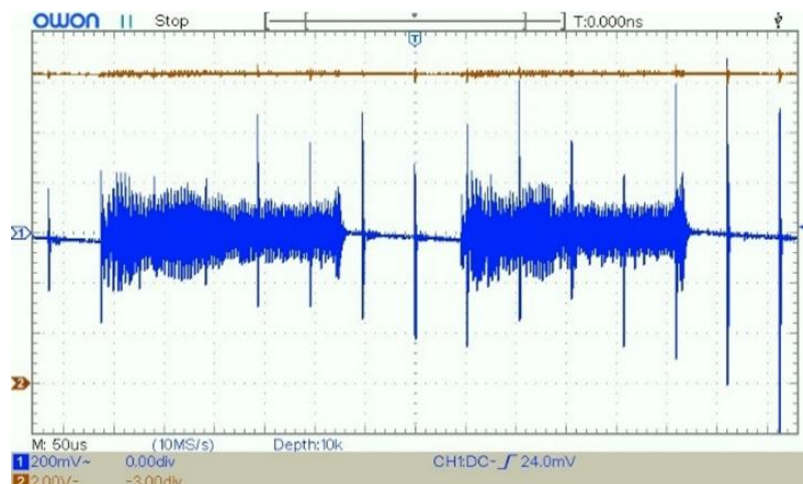


Рис.6 – Осциллограмма выхода блока питания 12 В
(оранжевый канал – DC, 2 В/дел; синий канал – AC, 200 мВ/дел)

На полученной осциллограмме видно, что при использовании режима AC, появляется возможность установить деление клетки в 10 раз меньше, чем в режиме DC. Это позволяет лучше разглядеть пики сигнала.

Полоса пропускания осциллографа.

Чем выше полоса пропускания осциллографа, тем большей частоты сигналы он может корректно отобразить.

Если рассматривать синусоидальный сигнал, то он будет отображаться во всей полосе пропускания, как синусоидальный, однако по мере приближения частоты сигнала к полосе пропускания, амплитуда сигнала будет уменьшаться. Более сложные сигналы, например меандр (импульсный сигнал прямоугольной формы, у которого время импульса

равно времени паузы), будут корректно отображаться только до частоты, примерно в 10 раз меньшей, чем полоса пропускания измерительного прибора. Например, при полосе пропускания в 100 МГц сигналы прямоугольной формы будут корректно отображаться примерно до частоты 10 МГц. При дальнейшем увеличении частоты сигнала его форма будет становиться похожа на синусоиду. Более подробно данная тематика раскрыта в источнике [3,4].

Ограничения на полосу пропускания вносят три фактора.

Первый фактор – аппаратные характеристики осциллографа [5]. Так, например у осциллографа OWON SDS 1102 в режиме 1:1 максимальная полоса пропускания имеет ограничение 5 МГц, максимальная полоса пропускания 100 МГц доступна только в режиме 1:10.

Второй фактор – характеристики щупа, к примеру, в режиме 1:10 полоса пропускания щупа составляет 100 МГц, а в режиме 1:1 – 6 МГц.

Третий фактор – программное ограничение полосы пропускания осциллографа. У большинства осциллографов с полосой пропускания 100 МГц и более есть возможность в настройках ограничивать полосу пропускания. Данная настройка используется для того, чтобы сделать сигнал более «чистым» для визуального анализа. Функцию ограничения частоты стоит включать только в тех режимах, когда частота измеряемого сигнала значительно меньше задаваемой частоты ограничения, иначе возможны искажения формы сигнала.

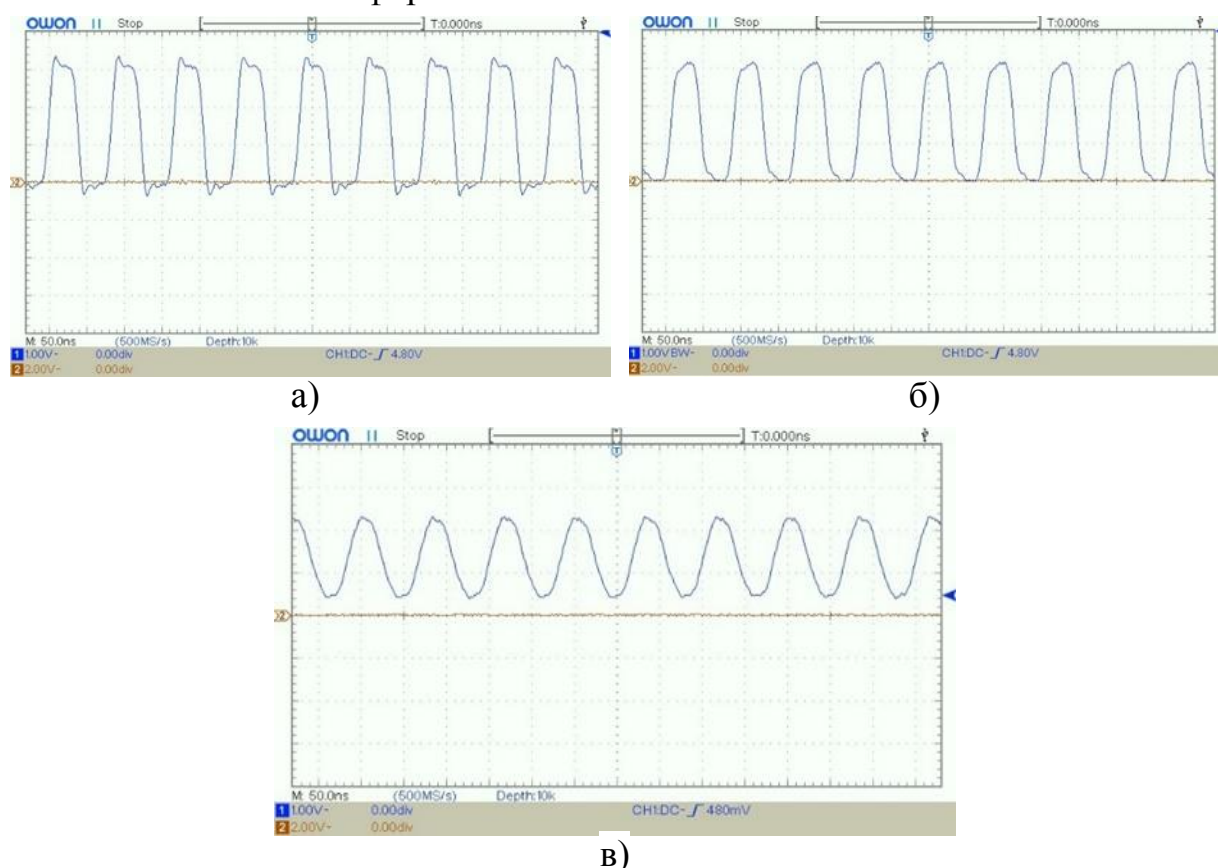


Рис.7 – Осциллограммы а) полоса пропускания 100 МГц; б) полоса пропускания 20 МГц; в) полоса пропускания 5 МГц

На Рис.7 приведены осциллограммы для прямоугольного импульсного сигнала с частотой 12 МГц и заполнением 50 %. При этом, на Рис.7а аппаратное ограничение полосы пропускания 100 МГц. На Рис.7б установлено программное ограничение полосы пропускания осциллографа составляет 20 МГц. На Рис.7в аппаратное ограничение полосы пропускания осциллографа составляет 5 МГц. Как можно заметить из этих рисунков, чем ниже частота пропускания осциллографа, тем больше сигнал становится похож на синусоиду и искажается не только по времени, но и по амплитуде.

Заземление осциллографа.

Согласно документации, осциллограф необходимо подключать к заземлению (Рис.8).



Рис.8 – Схема заземления осциллографа из документации

Заземление необходимо для защиты человека от поражения электрическим током. При наличии правильно выполненного заземления в здании, в случае некорректной работы оборудования ток будет протекать через заземление и не тронет человека, даже в случае прямого контакта, т.к. сопротивление металлических соединений много меньше сопротивления человеческого тела. В некоторых случаях, заземление также необходимо для обеспечения правильных условий работы электронных устройств.

Заземление играет важную роль в работе различного оборудования и защите человека. Правильность исполнения заземления в зданиях должны проверять специалисты. То, что в помещении установлены розетки с тремя контактами не означает наличие заземления. Помимо этого, хорошим заземлением нельзя считать просто металлический штырь, вбитый в землю, существуют определённые правила выполнения заземления.

Изолированные и неизолированные каналы.

Осциллографы могут быть с изолированными каналами и с неизолированными каналами (на текущий момент времени, подавляющее большинство цифровых осциллографов имеют неизолированные каналы).

В случае неизолированных каналов, каналы осциллографа электрически соединены между собой и с земляным проводом сети 230 В. Данное подключение схематично отражено на Рис.9.

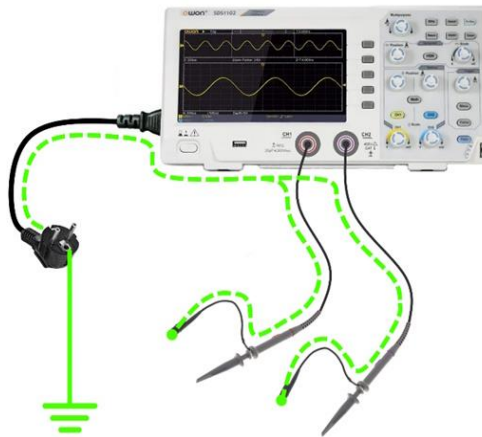


Рис.9 – Общая земля у осциллографа с неизолированными каналами

Чтобы определить изолированные каналы у осциллографа или нет – можно мультиметром измерить сопротивление между общими контактами обоих каналов и контактом заземления осциллографа. У осциллографа с неизолированными каналами сопротивление будет стремиться к нулю. Вилка осциллографа во время подключения к нему мультиметра должна быть отключена от сети.

При необходимости одновременного анализа нескольких сигналов важно правильно подключить каналы осциллографа.

Схемы, приведённые на Рис.10а и Рис.10б будут работать корректно только при подключении осциллографа с изолированными каналами.

Между двумя «крокодилами» неизолированных каналов сопротивление стремится к нулю, следовательно при подключении «крокодилов» к различным узлам электрической цепи может возникнуть короткое замыкание. Например, на Рис.10а основная часть тока потечёт в обход схемы через «крокодилы» и внутренние цепи осциллографа, в следствие чего замкнет источник питания. Помимо короткого замыкания, возможна некорректная работа схемы, приведенная на Рис.10б, где основная часть тока будет течь в обход резистора R_6 .

Схему подключения, приведённую на Рис.10в, можно использовать на любом осциллографе, т.к. «крокодилы» подключены к одному узлу электрической цепи.

У осциллографа с неизолированными каналами, оба «крокодила» должны быть подсоединены к одному и тому же узлу электрической цепи.

Несмотря на то, что «крокодилы» каналов электрически связаны между собой, при работе с несколькими каналами не рекомендуется оставлять один из «крокодилов» неподключенным вовсе, поскольку есть вероятность возрастания погрешности измерений.

Работа с сетевым напряжением.

При измерении сетевого напряжения (того же от которого питается осциллограф) следует помнить, что «крокодилы» измерительных щупов осциллографа связаны с землёй сети, таким образом при некорректном подключении «крокодила» и щупа к розетке (Рис.11) есть вероятность замкнуть фазу на землю, получив тем самым короткое замыкание. В такой ситуации возникает вероятность повреждения осциллографа [6].

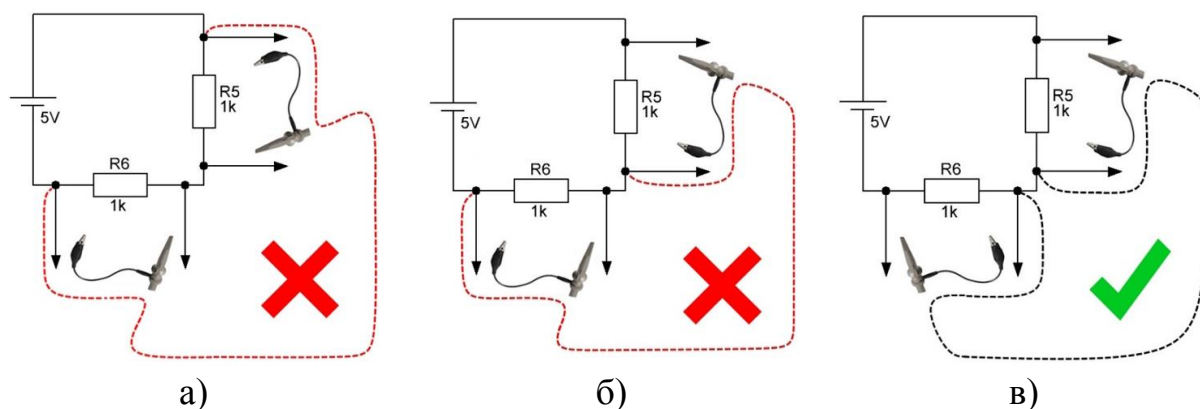


Рис.10 – Схемы вариантов подключения щупов осциллографа с неизолированными каналами: а) схема, которая приведёт к короткому замыканию (КЗ); б) схема, которая приведёт к неправильной работе (замкнутому $R6$); в) корректная схема подключения

Многие осциллографы поддерживают функцию подключения к компьютеру для передачи показаний и управления с компьютера. При подключении осциллографа к компьютеру по USB (или RS232) рекомендуется использовать гальваническую развязку для USB (RS232), например на основе микросхемы ADUM3160. В некоторых ситуациях это относительно недорогое решение позволяет сохранить аппаратную работоспособность компьютера при некорректном подключении осциллографа к измеряемому устройству.

Способы гальванической развязки сетевого напряжения.

Чтобы снизить вероятность повреждения прибора при измерении сетевого напряжения, можно реализовать гальваническую развязку. Для этого существует несколько способов.

Первый способ: использование дифференциальных пробников [7]. Это наиболее предпочтительный для использования способ. Он обеспечивает гальваническую развязку одного канала от других каналов осциллографа и от сети питания. Пример использования дифференциального пробника приведен на Рис.12.

Существенным недостатком таких устройств является достаточно высокая стоимость. При отсутствии частой необходимости и аккуратной работе можно воспользоваться менее безопасными, но более экономичными способами подключения.

Второй способ: использование розетки без контакта заземления. Данный способ не корректный и не рекомендуется к применению, ведь согласно документации, осциллограф необходимо заземлять.

Пользоваться незаземлённым осциллографом опасно, т.к. на «крокодилах» и металлических частях связанных с заземлением будет потенциал 115 В. Причина появления данного потенциала будет объяснена в следующем разделе. Если человек одной рукой возьмётся за какой-либо из этих контактов, а второй коснётся земли/заземлённого металлического оборудования, то он получит поражение электрическим током.

Третий способ: использование развязывающего трансформатора [8].

Реализация гальванической развязки питания осциллографа или измеряемого устройства позволяет снизить вероятность повреждения устройств при проведении измерений.

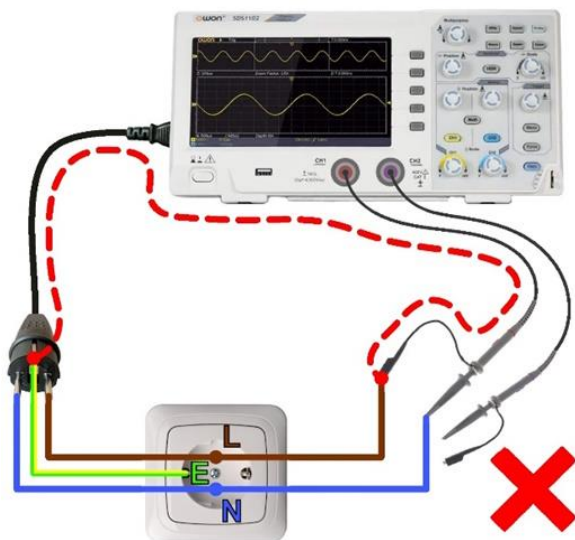


Рис.11 – Некорректное (опасное) измерение сетевого напряжения

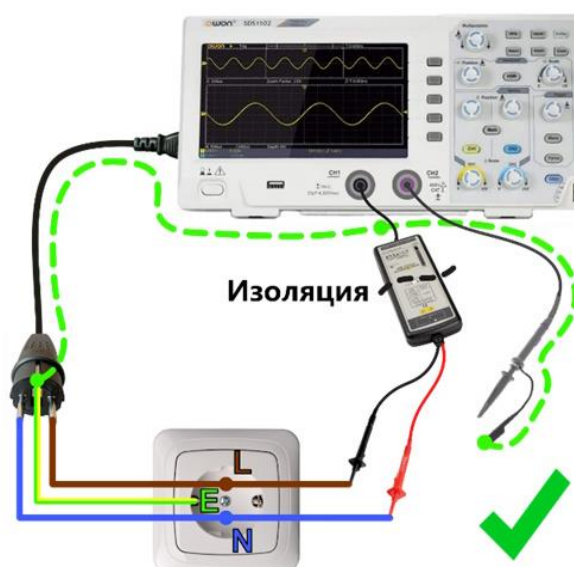


Рис.12 – Безопасное измерение сетевого напряжения при использовании дифференциального пробника

При исследовании сигналов в устройствах, подключаемых к сетевому напряжению (например, блоках питания), некорректное подключение щупов осциллографа с неизолированными каналами может привести к замыканию фазы на заземление. Это может вывести из строя оба устройства, а в худшем случае и привести к удару человека электрическим током. Поэтому при проведении исследования приборов, связанных с сетевым напряжением необходимо обеспечивать гальваническую развязку исследуемого устройства или осциллографа.

При использовании данного способа рекомендуется заземлять осциллограф и с помощью трансформатора гальванически развязывать питание исследуемого устройства от сети 230 В.

В случае, когда исследуемое устройство требует питания, мощностью несколько сотен Ватт и выше, или имеет обязательное требование подключения к заземлению, подключение к нему трансформатора для гальванической развязки становится невозможным. В такой ситуации можно гальванически изолировать питание осциллографа. Гальваническая развязка питания осциллографа менее безопасна, чем гальваническая развязка питания исследуемого устройства, но более безопасна, чем использование осциллографа в розетке без заземления. Это связано с тем, что на «крокодилах» и всех металлических выводах есть потенциал 115 В, но он рассматривается только относительно выхода трансформатора. В таком случае, если человек одной рукой возьмётся за какой-либо из этих контактов, а второй коснётся земли/заземлённого металлического оборудования, то его не ударит током, т.к. не будет замкнутого контура.

Четвёртый способ: Использование осциллографов с аккумуляторным питанием. Существуют портативные осциллографы, с аккумулятором в качестве источника питания. При желании, некоторые осциллографы, которые имеют питание от сети также можно модифицировать на аккумуляторное питание [9]. Данный способ является безопасным, из-за отсутствия связи с сетью 230 В.

Приведённые варианты развязки питания осциллографа (от розетки без заземления, от трансформаторной развязки, при питании осциллографа от аккумулятора) не являются абсолютно безопасными!

Неизолированные каналы осциллографа по-прежнему соединены между собой, а при наличии металлического корпуса, вероятно ещё и с ним. При подключении крокодилов к различным узлам схемы всё ещё может произойти короткое замыкание. Также, если к «крокодилу» щупа подключено сетевое напряжение и человек коснётся какого-либо металлического контакта осциллографа, велика вероятность поражения электрическим током!

Трансформаторная гальваническая развязка сетевого напряжения.

Корректным решением является гальваническая развязка питания измеряемого устройства и заземление осциллографа. Однако, это не всегда применимо, например, будет затруднительно установить трансформаторную развязку для устройства с высокой мощностью, т.к. потребуются трансформатор с соответствующей мощностью, а значит и большими габаритами, и очень высокой стоимостью. Помимо этого, некоторые устройства могут предъявлять обязательное требование к заземлению. В подобных ситуациях можно гальванически развязать питание осциллографа, что будет менее безопасно.

Наиболее простым способом гальванической развязки осциллографа от сети является трансформаторная развязка. Для реализации гальванической развязки от сети питания можно использовать развязывающий трансформатор с коэффициентом трансформации 1:1. То есть, при напряжении 230 В на входе, на выходе будет так же 230 В. Альтернативным вариантом является последовательное включение двух трансформаторов, с одинаковым коэффициентом передачи. К примеру, можно использовать трансформаторы 230 В – 12 В и 12 В – 230 В. Схемы реализации гальванической развязки с помощью подключения трансформаторов приведены на Рис.13.

При осуществлении гальванической развязки необходимо отказаться от подключения к заземлению, поскольку через него оборудование будет связано с сетью и действие гальванической развязки обесценится. Корпус трансформатора так же не должен касаться металлических поверхностей.

Чтобы более наглядно продемонстрировать взаимодействие человека с сетевым напряжением приведены Рис.14 – Рис.17, данные схемы являются упрощёнными.

Рассмотрим Рис.14а. С трансформаторной подстанции в каждое здание подводится сетевое напряжение 230 В. Как правило трансформаторные подстанции заземлены, поэтому при прямом контакте человека, стоящего на земле с фазовым проводом L , через человека потечёт ток.

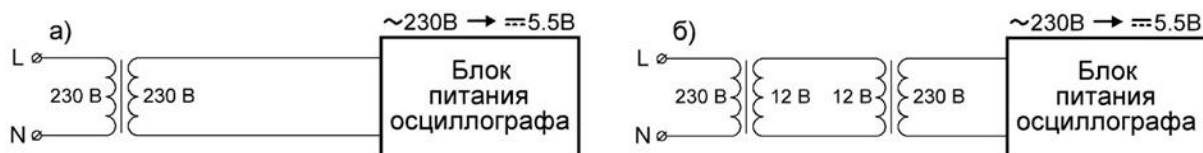


Рис.13 – Схемы реализации гальванической развязки с помощью трансформаторов: а) развязывающий трансформатор с коэффициентом трансформации 1:1; б) последовательное включение двух трансформаторов, с одинаковым коэффициентом передачи



Рис.14 – Взаимодействие человека с сетевым напряжением: а) опасное; б) «безопасное»

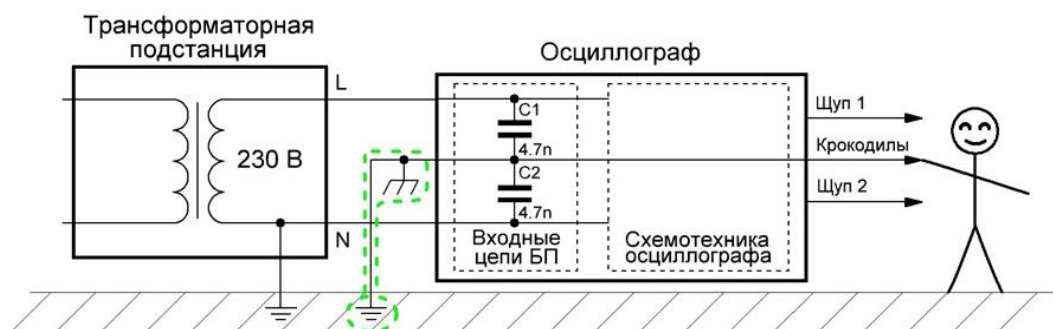


Рис.15 – «Безопасное» использование осциллографа с заземлением

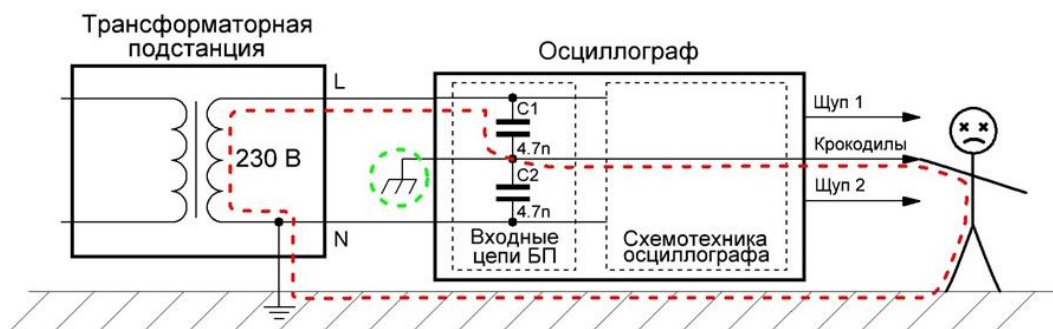


Рис.16 – Опасное использование осциллографа без заземления

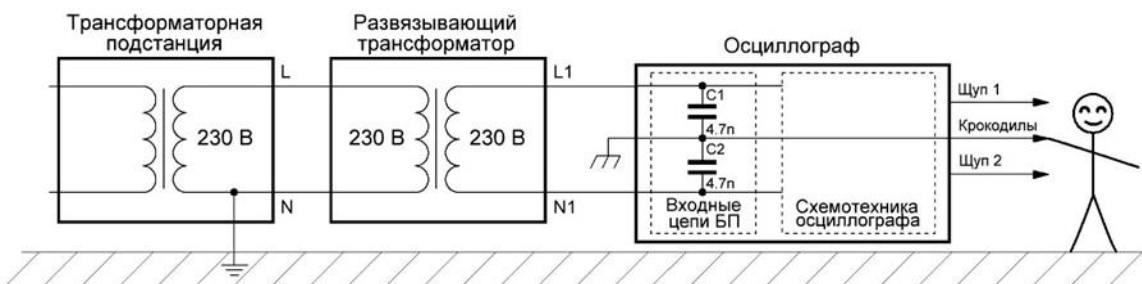


Рис.17 – «Безопасное» использование осциллографа без заземления с развязывающим трансформатором

Если в розетку включить трансформатор (Рис.14б) и не подключать его вторичные обмотки к заземлению, то при контакте человека, стоящего на земле с проводом L или проводом N ничего не произойдёт, по причине отсутствия разницы потенциалов. Человек получит удар током только если коснётся одновременно проводников L и N .

На Рис.15 отображено подключение осциллографа через розетку с контактом заземления. При таком подключении разность потенциалов между землёй и «крокодилами» щупов осциллографа отсутствует, поэтому такое включение является безопасным.

Рис.16 демонстрирует подключение осциллографа к розетке без заземления. Как известно, конденсаторы не пропускают постоянный ток, и «пропускают» переменный [10]. В блоке питания (БП) осциллографа установлены конденсаторы Х-типа $C1$ и $C2$. Их средняя точка соединена с землёй осциллографа. Из-за данных конденсаторов, на «крокодилах» и других элементах, соединённых с заземлением осциллографа, возникает напряжение 115 В относительно фазы и нейтрали. При контакте человека, стоящего на земле, с «крокодилами» незаземлённого осциллографа произойдёт поражение электрическим током.

Рис.17 показывает, что при таком питании осциллографа через трансформатор, человек, стоящий на земле может касаться «крокодилов», не боясь поражения электрическим током, т.к. из-за наличия гальванической развязки не будет разницы потенциалов между землёй и заземлением осциллографа.

Так, на Рис.18 приведена схема, когда безопасное включение осциллографа с питанием от аккумулятора (то есть гальванически развязанного от сети 230 В) становится опасным для человека, стоящего на земле, потому что «крокодил» осциллографа подключен к фазе исследуемого устройства.

Обратите внимание, в указанном выше материале приведены упрощённые выкладки и высказывания. При выполнении подключения оборудования на производстве рекомендуется проконсультироваться со специалистами по технике безопасности.

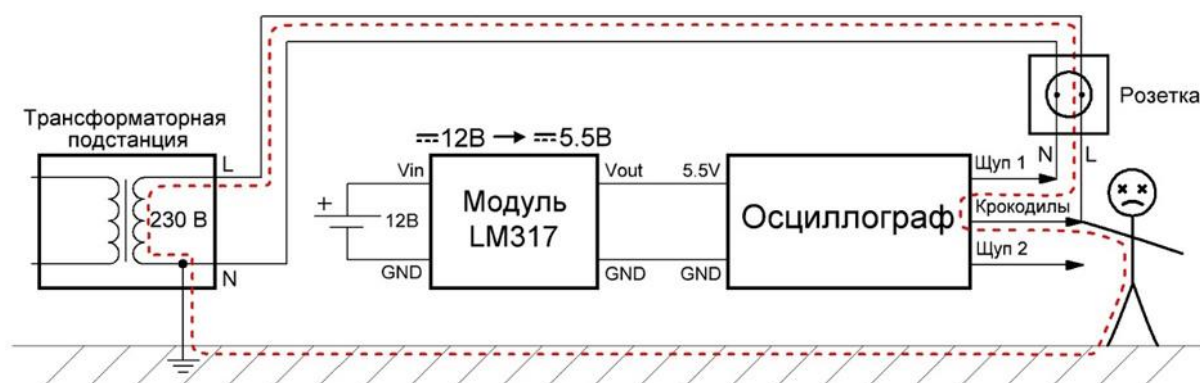


Рис.18 – «Безопасное» использование осциллографа с аккумуляторным питанием становится небезопасным

На приведённых выше схемах необязательно стоять непосредственно на земле. В рассматриваемых ситуациях предусматривается также случайное прикосновение к любому устройству или предмету, связанному с заземлением, например, отопительные батареи в домах часто соединены с заземлением.

Выводы.

При работе с осциллографом важно помнить о технике безопасности. Перед работой с любым устройством необходимо внимательно ознакомиться с документацией к нему и провести регулировку щупов. Работа с осциллографом, требует внимания к подключению щупов и установке режимов делителя, чтобы не испортить прибор и подключаемую схему. При проведении определённых измерений осциллографу с неизолированными каналами требуется обеспечить гальваническую развязку от сети.

В статье освещены некоторые особенности использования цифровых осциллографов, которые полезны как начинающим, так и опытным пользователям.

Библиографический список.

1. Документация на осциллограф OWON SDS1102. – URL: https://www.owon.com.hk/products_owon_sds1000_2ch_series_super_economical_type_digital_oscilloscope (дата обращения: 17.03.2025).
2. Щуп осциллографа. Устройство и принцип работы. – URL: <https://habr.com/ru/articles/594915/> (дата обращения: 17.03.2025).
3. Смит Т. Связь между полосой пропускания осциллографа, временем нарастания и точностью измерения / Т. Смит, Р. Кернасовский // Компоненты и технологии. – 2009. – №5 – С. 134-136 – URL: <https://kit-e.ru/svyaz-mezhdu-polosoj-propuskaniya-oscillografa-vremenem-narastaniya-i-tochnostyu-izmereniya/> (дата обращения: 04.02.2025).
4. О полосе пропускания осциллографа и отображаемой форме сигнала [электронный ресурс] – URL: <https://compacttool.ru/praktika/o-polose-propuskaniya-oscillografa-i-otobrazhaemoy-forme-signala> (дата обращения: 17.03.2025).
5. Стернс Ф. Частота дискретизации осциллографа и её влияние на полосу пропускания / Ф. Стернс // Контрольно-измерительные приборы и системы. – 2008. – С. 24-26 – URL: https://www.kipis.ru/upload/kipis_articles/article_Agilent_5-2008.pdf (дата обращения: 17.03.2025).
6. Как посмотреть сигналы на стороне сетевого напряжения и не повредить приборы. – URL: <https://habr.com/ru/articles/537612/> (дата обращения: 17.03.2025).
7. Пробники от А до Я: учебное пособие [электронный ресурс] – URL: https://www.eliks.ru/upload/tektronix/60u_6053_13_abcs_of_probes.pdf (дата обращения: 17.03.2025).
8. Макаров Д. Что такое разделительный трансформатор: конструкция, принцип действия / Д. Макаров [электронный ресурс] – URL:

<https://www.asutpp.ru/razdelitelnyj-transformator.html> (дата обращения: 17.03.2025).

9. Волобуев К.А. Питание осциллографа SDS1102 от сети и внешнего аккумулятора / К.А. Волобуев, В.М. Москалева, И.В. Трубин, В.Г. Трубин // Известия Томского политехнического университета. Промышленная кибернетика. – 2025. – Т. 3. №1 – С. 1-7 – URL: <https://indcyb.ru/journal/article/view/81/64> (дата обращения: 17.03.2025).
10. Меркулов В.И. Основы конденсаторостроения: учебное пособие / В.И. Меркулов – Томск: Изд. ТПУ – 2001. – 121 с. – URL: https://portal.tpu.ru/departments/kafedra/eict/Work/Tab2/EICT_OCB.pdf (дата обращения: 17.03.2025).

¹Волобуев Кирилл Андреевич, студент, kirya.volobuev@mail.ru, Россия, Новосибирск, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

²Москалева Виолетта Михайловна, студент, violetta.moskaleva@mail.ru, Россия, Новосибирск, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

³Трубин Игорь Витальевич, старший преподаватель, i.trubin@corp.nstu.ru, Россия, Новосибирск, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

⁴Трубин Виталий Геннадьевич, старший преподаватель, trubin@corp.nstu.ru, Россия, Новосибирск, ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

Volobuev Kirill Andreevich, Student, kirya.volobuev@mail.ru, Russia, Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University

Moskaleva Violetta Mikhailovna, Student, violetta.moskaleva@mail.ru, Russia, Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University

Trubin Igor Vitalievich, Senior Lecturer, i.trubin@corp.nstu.ru, Russia, Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University

Trubin Vitaly Gennadievich, Senior Lecturer, trubin@corp.nstu.ru Russia, Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ОБЪЕКТОВ ПО ИЗОБРАЖЕНИЮ ПУТЁМ ИХ СОПОСТАВЛЕНИЯ С ШАХМАТНОЙ ДОСКОЙ ИЗВЕСТНОГО РАЗМЕРА

Липко И.Ю.¹, Якунин Р.Д.²

DETERMINING THE SIZE OF OBJECTS IN AN IMAGE BY COMPARING THEM WITH A CHESSBOARD OF KNOWN SIZE

Lipko I.U.¹, Yakunin R.D.²

Аннотация. Статья посвящена задаче измерения размеров объектов на фотографии путём сопоставления их размеров на фотографии и реальных размеров. Для этого используется специальная маркерная доска с шахматной разливкой. Это позволяет достаточно хорошо определять её положение на изображении и размеры. Основная трудность состоит в учёте геометрических искажений объектов и их расположение относительно камеры. Приводятся результаты применения метода на изображениях 4K-размером. Выявлено, что при расстоянии от маркера до 2 метров средняя погрешность равна 10 см. При увеличении расстояния погрешность увеличивается.

Abstract. The article is devoted to the problem of measuring the size of objects in a photo by comparing their sizes in a photo and their actual sizes. For this purpose, a special checkerboard marker board is used. This allows you to determine its position in the image and its dimensions quite well. The main difficulty is taking into account the geometric distortions of objects and their location relative to the camera. The results of applying the method on 4K-sized images are presented. It was revealed that the average error is 10 cm at the distance of up to 2 meters from the marker. As the distance increases, the error increases.

Ключевые слова. Изображение, измерение расстояния, измерение размеров, шахматная доска.

Keywords. Image, distance measurement, dimension measurement, chessboard.

Введение.

Нейросетевые методы получили достаточно большое распространение и хорошо решают задачи в таких направлениях работы с изображениями как сегментация, детекция, локализация и классификация [1,2]. Тем не менее классические методы остаются также актуальны: измерение дальности [3...7], цветовая коррекция, сравнение

изображений и геометрические преобразования [8,9]. В статье рассматривается задача определения размеров элементов фасадов здания: окна, двери, подоконники и прочее. Смысл этой прикладной задачи в автоматизации процесса создания документации для строительных организаций и организаций охраны объектов культурного наследия. Подобные задачи часто встречаются в робототехнике [9,10].

Цель работы заключается в выявлении точности метода сопоставления размеров в задаче оценки размеров элементов фасада здания.

Метод решения.

В основе решения используется принцип сопоставления размеров известного предмета (маркера) с размерами неизвестного объекта:

$$\frac{X_{MM}}{X_{px}} = K,$$

где X_{px} – размер объекта в пикселях, X_{MM} – размер объекта в миллиметрах, K – коэффициент пересчёта пикселей в миллиметры.

Размеры маркера заранее известны. Его истинный натурный размер 520 мм на 280 мм. На вход подаются изображения размером 4160×3120 пикселей. Размеры в пикселях зависят от ракурса съёмки и расположения маркера относительно измеряемой плоскости. Используя коэффициент K , размер объекта рассчитывается в миллиметрах.

Фотографии, сделаны таким образом, что плоскости шахматной доски и измеряемых поверхностей находятся под углом к камере. Учёт этой перспективы можно выполнить путём постановки в соответствие известных координат и размеров с фотографией. Для этого формируется матрица, позволяющая делать в плоскости маркера трансформацию пикселей в миллиметры:

$$\begin{bmatrix} t_i x'_i \\ t_i y'_i \\ t_i \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix},$$

где x'_i, y'_i – координаты в миллиметрах, x_i, y_i – координаты в пикселях, M – матрица трансформации перспективы, t_i – масштабирующий коэффициент.

При разметке данных плоскость разметки точно сходится с плоскостью измерений.

Основные гипотезы, которые позволяют применять метод и от чего зависит точность:

- маркер находится в одной плоскости с измеряемой плоскостью;
- оси маркера сонаправлены осям измеряемой плоскости.

Достоинства:

- измерение размеров в одной плоскости с маркером;
- простые вычислительные требования.

Недостаток: объекты, плоскость которых сильно отличается от плоскости маркера, будут иметь большие погрешности.

Обсуждение результатов.

Была выполнена разметка объектов с известными размерами по набору фотографий. По линиям известных размеров применён метод оценки расстояния. Получены оценки размеров объектов. Среди выполненных измерений: размеры окон, дверей, расстояния от окон до края стены, расстояние между окнами и т.п.

Для получения статистических данных о погрешности измерений относительно размеченной области выполнены измерения в случайных равномерно распределенных точках по всему кадру.

На Рис.1 показаны исходная фотография и соответствующая ей статистическая развёртка, показывающая точки, выбранные для оценки погрешности измерений. На этой развёртке каждая точка – это одно измерение. Чем больше точка, тем больше погрешность. По осям указаны расстояния от точек отрезка измерения до маркера. Название осей «начало» и «конец» обозначают точки начала и конца отрезка, вдоль которого производится оценка расстояния. Оранжевым светом показаны точки, для которых были произведены измерения известных объектов: окна, двери, карнизы и т.п.; размеры которых мы знаем или можем оценить по смыслу.

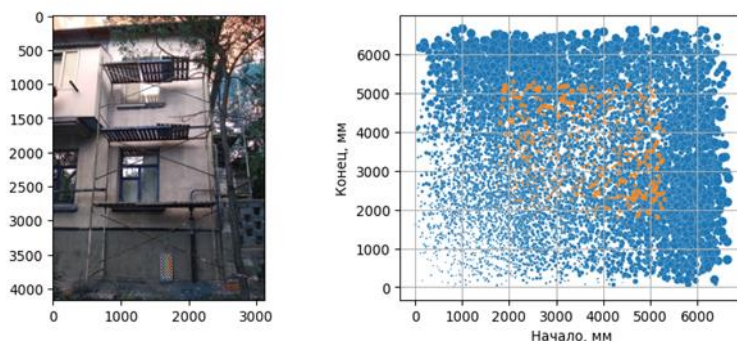


Рис.1 – Кадр (слева) и точки, выбранные для оценки погрешности (справа)

На Рис.2 показана зависимость погрешности измерения истинной величины от расстояния от точки до маркера на фотографии. Светлым указана линия тренда. Эта закономерность увеличения погрешности от расстояния до маркера сохраняется почти для всех фотографий.

Источники погрешности:

- ошибки при разметке истинно известных величин ввиду размытости кадра, невозможности точно расположить курсор мыши;
- ошибки и допуски измерительного инструмента;
- отсутствие на чертеже точного размера;

- численный метод определяет положение точек маркерной доски точнее, чем человек делает разметку;
- маленький размер площади, на которой выполнена разметка.

На Рис.3 показан пример фотографии с наличием перспективы, а сравнение результатов оценок размеров по фотографии в сравнении с истинными величинами показано в таблице 1. Так, например, было сделано несколько измерений расстояния от угла дома до левого края окна, ширины и высоты окна.

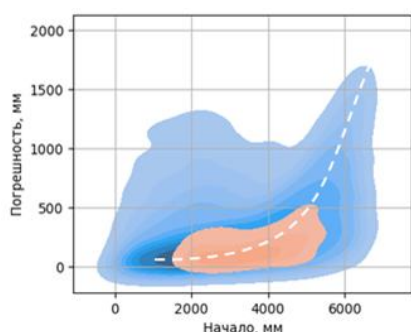


Рис.2 – Оценка погрешности для одной из фотографий



Рис.3 – Пример измерений

Таблица 2 – Результаты сравнения истинных размеров с оценками

Что измерено	Метод, мм	Истина, мм
От левого края окна до края стены дома	3796	2845
	3893	2845
Ширина окна	1294	1300
	1310	1300
Высота окна	1763	1800
	1670	1800
	1746	1800

Заключение.

Измерения, выполненные по фотографиям без проявления сильной перспективы, позволяют достичь измерений с погрешностью от 100 мм до 500 мм. Наибольшая средняя погрешность достигает 1200-1500 мм на расстоянии 7000-8000 мм от маркера. Чем дальше выбираемые для измерения точки от маркера, тем больше погрешность. Чтобы делать верные выводы при анализе статистических развёрток фотографий, следует ориентироваться на области с наибольшей плотностью точек, поскольку большинство ручных измерений выполнялись именно в них.

Библиографический список.

1. Letenkov M.A. ML based approach for determining the spatial position and size of objects on images / M.A. Letenkov, E.O. Cherskikh // Computational Technologies. – 2024. – Vol. 29, No. 2. – P. 79-94.
2. Андриянов Н.А. Обнаружение объектов на изображении: от критериев Байеса и Неймана-Пирсона к детекторам на базе нейронных сетей / Н.А. Андриянов, В.Е. Дементьев, А.Г. Ташлинский // Компьютерная оптика.

- 2022. – Т. 46. – № 1. – С. 139-159. – DOI 10.18287/2412-6179-CO-922.
3. Козлов В.Л. Измеритель дальности и размерных параметров объектов на основе цифровой фотокамеры / В.Л. Козлов, И.Р. Кузьмичев // Вестник БГУ. Серия 1, Физика. Математика. Информатика. – 2011. – № 1. – С. 33-38.
4. Бурадчук М.А. Описание метода определения реальных геометрических размеров здания по фотографии / М.А. Бурадчук // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2024. – Т. 1. – С. 413-419.
5. Патент № 2485443, Российская Федерация, МПК G01C 3/08, G01S 11/12. Способ измерения расстояний на цифровой фотокамере: № 2011151194/28: заявл. 14.12.2011: опубл. 20.06.2013 / В.Л. Козлов заявитель Белорусский государственный университет.
6. Скворцов Б.В. Фотопроекционный метод измерения геометрических параметров объектов сложной формы / Б.В. Скворцов, А.В. Черных, А.Н. Малышева-Стройкова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18. – № 4-6. – С. 1242-1249.
7. Шеховцов Г. А. О методике и результатах калибровки фотокамер с целью измерения расстояний / Г.А. Шеховцов, Р.П. Шеховцова, Ю.Н. Раскаткин // Геодезия и картография. – 2016. – № 2. – С. 46-53.
8. Савченко Ю.М. Современные возможности использования фотограмметрии / Ю.М. Савченко, Г.Г. Турк, И.Н. Гурский // Московский экономический журнал. – 2024. – Т. 9, № 1.
9. Tropin D.V. Improved algorithm of ID card detection by a priori knowledge of the document aspect ratio / D.V. Tropin, I.A. Konovalenko, N.S. Skoryukina, D.P. Nikolaev, V.V. Arlazarov // Thirteenth International Conference on Machine Vision. – 2021. – V. 11605. – P. 116051F. – DOI: 10.1117/12.2587029.
10. Мурзиненко Д.Р. Видеосистема определения положения робота-манипулятора в пространстве / Д.Р. Мурзиненко, Д.С. Надеждин // Материалы VI Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. – 2020. – С. 47-50.

¹*Липко Иван Юрьевич, старший преподаватель, ivanlipko@yandex.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

²*Якунин Роман Денисович, ассистент, RYakunin@sevsu.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»*

Lipko Ivan Urievich, Senior Lecturer, ivanlipko@yandex.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

Yakunin Roman Denisovich, Assistant, RYakunin@sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ УСТРОЙСТВ РАЗМЕРНОЙ СОРТИРОВКИ ДЕТАЛЕЙ

Балакина Н.А.¹

ACCURACY ANALYSIS OF DIMENSIONAL SORTING DEVICES

Balakina N.A.¹

Аннотация. Приводятся схемы высокоточных средств контроля геометрических параметров деталей, методики расчета погрешности измерения, сортировки и допускаемой погрешности измерительных преобразователей. Проведен анализ метрологических характеристик индуктивных и сортировочных фотоэлектрических преобразователей и соответствие их погрешности измерения допускаемой величине. Рассмотрены технические характеристики автоматов и установлено, что не все модели контрольно-сортировочных автоматов удовлетворяют условию разноразмерности деталей в группах сортировки. Обоснована необходимость применения многократных измерений для повышения точности сортировки деталей и снижения величины разноразмерности.

Abstract. Schemes of high-precision means of control of geometrical parameters of parts, methods of calculation of measurement error, sorting, tolerance error of measuring transducers are given. The metrological characteristics of inductive and sorting photoelectric converters and the compliance of their measurement error with the tolerance value are analyzed. The technical characteristics of automata are considered and it is established that not all models of control and sorting automata satisfy the condition of different sizes of parts in sorting groups. The necessity of application of multiple measurements to increase the accuracy of parts sorting and to reduce the value of different sizes has been substantiated.

Ключевые слова. Измерение, сортировка, преобразователь, интервал сортировки, разноразмерность, погрешность, контрольно-сортировочный автомат.

Keywords. Measurement, sorting, transducer, sorting interval, diversity, uncertainty, sorting control machine.

Введение.

Качество продукции, выпускаемой в машино- приборостроении, характеризуется широкой номенклатурой параметров: физико-химическими свойствами материалов; точностью размеров, формы и взаимного расположения элементов; свойствами поверхностного слоя изделий [1,4]. Совокупность средств и организационно-технических

мероприятий, предназначенных для обеспечения, поддержания и проверки выполнения заданного уровня качества продукции на всех этапах ее изготовления составляет систему контроля качества производимой продукции. Обеспечение выпуска продукции требуемого качества неразрывно связано с технологическим процессом изготовления и организацией контроля продукции. Систему контроля качества определяют: технологический процесс, программа выпуска, технические требования к детали, допустимый процент брака, а также необходимость сортировки на группы, число групп и др. [7,8].

Обеспечение качества продукции в машино- и приборостроении невозможно без повышения точности контрольно-измерительных операций, в том числе измерения геометрических параметров деталей с использованием самоподнастраивающихся измерительных систем, автоматических устройств контроля формы поверхностей деталей, контрольно-сортировочных автоматов.

Целью работы является обоснование применения процесса многократных измерений, формирования управляющих команд и снижения величины разноразмерности деталей в группах сортировки контрольно-сортировочных автоматов.

В автоматизированных устройствах измерения параметров геометрической формы деталей, как правило, используются те же самые первичные измерительные преобразователи и отсчетные устройства, что и при контроле линейных размеров [4,9]. Более того, в случае комплексных измерений контроль размеров и погрешности формы изделий производится на одной и той же позиции с помощью одного и того же первичного преобразователя. При этом следует отметить, что допуск на отклонение формы IT_ϕ и взаимного расположения поверхностей может составлять 20 – 50% от допуска на размер IT . Таким образом, $IT_\phi = (0,2...0,5)IT$, а допускаемая погрешность измерения отклонения формы будет равна

$$[\delta_{изм\phi}] = (0,1...0,3)IT_\phi,$$

т.е. точность измерительного прибора при контроле отклонения формы и взаимного расположения поверхностей должна быть в 2...5 раз выше, чем при контроле линейного размера [2...4].

Устройство контроля формы деталей [9] представлено на Рис.1. Контролируемая деталь 1 устанавливается в измерительные центры 2. Первичный преобразователь 3 закреплён на стойке 4, а его измерительный наконечник контактирует с поверхностью детали 1. Для движения измерительного преобразователя вдоль образующей поверхности вала и измерения отклонения его формы в продольном сечении стойка 4 закреплена на подвижной каретке 5 шариковой направляющей. Перемещение каретки осуществляется электродвигателем посредством

винтовой передачи 6. Сигнал с преобразователя 3 подается на отсчетно-командное устройство 7. Погрешность формы $\Delta\phi$ в виде бочкообразности или конусообразности определяется по результатам измерения r_{min} и r_{max} при продольном перемещении каретки 5 с преобразователем 3.

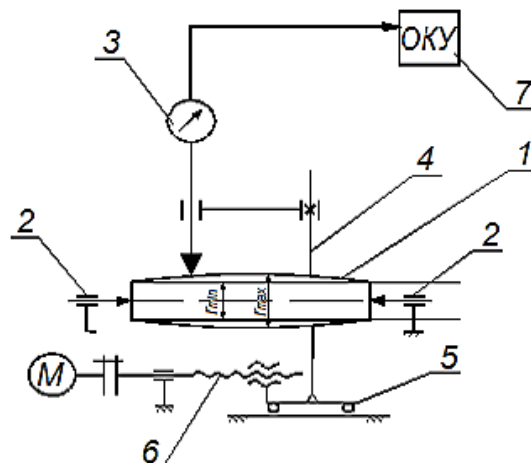


Рис.1 – Схема устройства для контроля формы вала в продольном сечении

В самоподнастраивающихся измерительных системах предусматривается автоматическая поднастройка измерительного преобразователя или определение поправки, вносимой в результат измерения с целью повышения точности измерения за счет компенсации систематических погрешностей измерения, возникающих вследствие износа измерительных наконечников и тепловых деформаций измерительной скобы, преобразователя и отсчетного устройства [5]. Для этого периодически в автоматическом режиме наконечники измерительной скобы вводятся в контакт с рабочим эталоном и по результатам его измерения определяется необходимость поднастройки преобразователя и ее величина.

На Рис.2 показана схема самоподнастраивающейся системы прибора активного контроля (СПС ПАК).

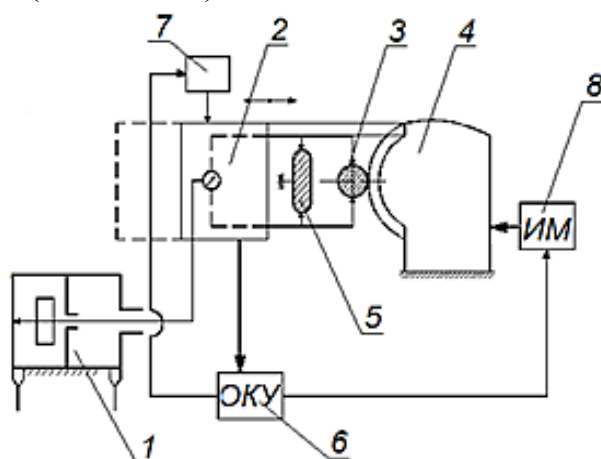


Рис.2 – Самоподнастраивающаяся система к прибору активного контроля

Средства активного контроля выполняют операции, необходимые для сравнения действительного размера обрабатываемой детали с

заданным размером, и в зависимости от результатов этого сравнения управляют технологическим процессом. Основной задачей средств активного контроля является устранение влияния на обрабатываемый размер различных факторов, действующих в системе станок-приспособление-инструмент-деталь (СПИД): износ режущего инструмента, температурные деформации, упругие силовые деформации, возникающие из-за нестабильности припуска на обработку, механических свойств обрабатываемого материала и затупления режущего инструмента.

Принцип работы СПС ПАК следующий. Подводящее устройство 1 перемещает измерительную скобу 2 в зону обработки. Скоба 2 контролирует диаметр детали в процессе шлифования и по мере съема припуска посредством отсчетно-командного устройства 6 формирует управляющие команды (K1 – переход с чернового шлифования на чистовое; K2 – конец обработки) на исполнительный механизм 8, осуществляющий перемещение шлифовальной бабки. При замене обрабатываемой детали скоба 2 отводится и при этом ее измерительные наконечники попадают на рабочий эталон 5. Если измерительный преобразователь скобы не показывает при этом нулевое (настроечное) значение, то отсчетно-командное устройство определяет величину поправки к результату измерения и дает команду на механизм 7 для поднастройки измерительного преобразователя.

Предельную погрешность измерительного устройства самоподнастраивающейся системы можно выразить следующим образом:

$$[\Delta_{сн}] = \sqrt{(\Delta_{рн} - A - \Delta_{об})^2 - \Delta_1^2 - B^2 - 3\Delta_2^2},$$

где A – величина подналадочного импульса или величина некомпенсируемых функциональных погрешностей; $\Delta_{об}$ – погрешность обратного хода при осуществлении двусторонней поднастройки; Δ_1 – случайные технологические погрешности, подчиняющиеся закону Гаусса, предельная величина которых составляет 6σ ; B – погрешности, обусловленные различным положением центра группирования в активной зоне в момент возникновения подналадочных импульсов. Эти погрешности принимают значения в зависимости от принятого метода поднастройки; $\Delta_{рн}$ – погрешности регулирования уровня настройки системы; Δ_2 – погрешности, обусловленные разностью коэффициентов статического и кинематического трения соответственно механизма поднастройки, исполнительного органа и компенсатора износа инструмента за счет правки.

Контрольно-сортировочные автоматы (КСА) являются сложными, специализированными механо-электронными измерительными системами и применяются в крупносерийном и массовом производствах, когда технологическая точность изготовления сопрягаемых деталей не позволяет

обеспечить требуемые точностные характеристики изделия. В этом случае изготовленные детали предварительно измеряются и сортируются на размерные группы, а затем сборка узла осуществляется с учетом номера группы сортировки сопрягаемых деталей. КСА широко используются в подшипниковой, автомобильной промышленности и других отраслях.

Контрольно-сортировочные автоматы состоят из следующих основных узлов: загрузочного устройства, транспортирующего устройства, измерительного устройства (позиции), сортировочного и отсчётно-командного устройств [9,12]. Схема КСА представлена на Рис.3.

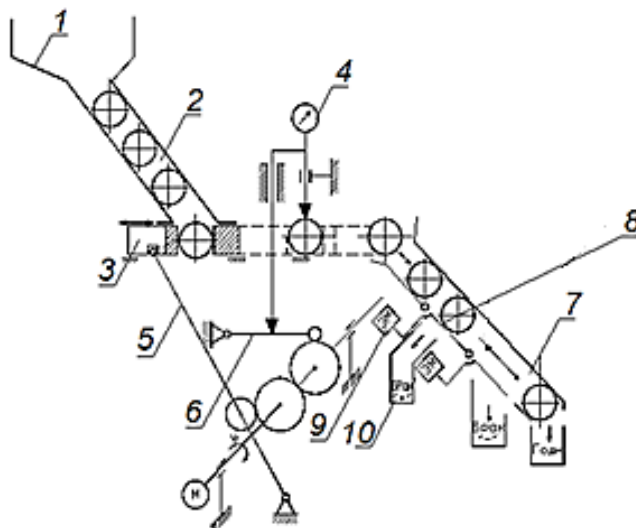


Рис.3 – Схема контрольно-сортировочного автомата

Принцип действия КСА следующий: поступающие из бункерного загрузочного устройства 1 в накопительный лоток 2 контролируемые детали поштучно, последовательно подаются толкателем 3 на измерительную позицию 4, а затем к сортировочному лотку 7. В зависимости от размера детали и группы сортировки срабатывает соответствующий электромагнит 9, открывается заслонка 8 и деталь попадает в сортировочный бункер 10. Для перемещения толкателя 3 и арретирования штока измерительного преобразователя с целью предохранения его от повреждения при установке детали на измерительную позицию служат кулачково-рычажные механизмы 5, 6.

Допускаемая погрешность измерения может быть определена согласно ГОСТ 8.051-81 или вычислена по формуле

$$[\delta_{изм}] = (0,1 \dots 0,3) IT,$$

где IT – допуск на контролируемый параметр.

Особенностью применения и выбора средства измерения, его типа и модели преобразователя для КСА является то, что диапазон измерения D должен соответствовать допуску IT на контролируемый параметр детали, а допускаемая погрешность измерения $[\delta_{изм}]_{сорт}$ определится исходя из интервала сортировки $И_c$ и зависит от числа групп сортировки n

$$[\delta_{изм}]_{сорт} = (0,1...0,3) IT / n = (0,1...0,3) I_c.$$

При этом, чем больше число групп сортировки, тем более точные измерения нужно производить, так как погрешность измерения определяется в зависимости не от допуска на размер, а от величины интервала сортировки, который в n раз меньше поля допуска. Погрешность средства измерения становится соизмерима с допускаемой погрешностью $[\delta_{изм}]_{сорт}$, что может привести к неправильной сортировке деталей.

Суммарная погрешность измерения при сортировке $\Delta_{\Sigma сорт}$ включает в себя ряд составляющих: погрешность рабочего эталона, $\Delta_{рэ}$; погрешность базирования, $\Delta_{б}$; погрешность объекта контроля, $\Delta_{ок}$; погрешность передаточного механизма, $\Delta_{нм}$; погрешность измерительного преобразователя, $\Delta_{ин}$; температурную погрешность, Δ_t ; силовую погрешность, Δ_{Fn} .

Таким образом,

$$\Delta_{\Sigma сорт} = \Delta_{рэ} + \Delta_{б} + \Delta_{ок} + \Delta_{нм} + \Delta_{ин} + \Delta_t + \Delta_{Fu} \leq [\delta_{изм}]_{сорт}. \quad (1)$$

При проектировании измерительных станций КСА стремятся устранить ряд составляющих погрешностей или их минимизировать, например, погрешность передаточного механизма $\Delta_{нм}$, температурную погрешность Δ_t за счет стабилизации температуры средства контроля и контролируемых деталей, смещения уровня настройки преобразователя за счет его периодической проверки и поднастройки. С учетом изложенного формула (1) примет вид:

$$\Delta_{\Sigma сорт} = \Delta_{ок} + \Delta_{ин} + \Delta_{Fu} \leq (0,1...0,3) I_c. \quad (2)$$

Допустимая расчетная величина погрешности измерительного преобразователя с отсчетно-командным устройством $\Delta_{ин}$ в формуле (2) в свою очередь не должна превышать 20...30% от погрешности сортировки $\Delta_{\Sigma сорт}$ при равномерном ее распределении между тремя составляющими.

$$[\Delta_{ин}]_{расч} \leq (0,2...0,3) \Delta_{\Sigma сорт}. \quad (3)$$

С учетом формул (2) и (3) имеем

$$[\Delta_{ин}]_{расч} \leq (0,02...0,09) I_c.$$

Таким образом, при интервале сортировке $I_c = 0,5$ мкм погрешность измерительного преобразователя не должна превышать $[\Delta_{ин}]_{расч} = 0,010...0,045$ мкм.

В Таблице 1 показаны расчетные значения погрешности сортировки

$\Delta_{\Sigma сорт}$ и измерительного преобразователя $[\Delta_{un}]_{расч}$ для интервалов сортировки $I_c = 0,1...2,0$ мкм.

Таблица 1 – Расчетные значения погрешности сортировки $\Delta_{\Sigma сорт}$ и измерительного преобразователя $[\Delta_{un}]_{расч}$

Интервал сортировки I_c , мкм	Погрешность сортировки $\Delta_{\Sigma сорт}$, мкм	Погрешность измерительного преобразователя $[\Delta_{un}]_{расч}$, мкм
0,1	0,01...0,03	0,002...0,0027
0,15	0,015...0,045	0,003...0,0135
0,4	0,04...0,12	0,008...0,036
0,5	0,05...0,15	0,01...0,045
0,6	0,06...0,18	0,012...0,054
1,0	0,10...0,30	0,02...0,09
1,5	0,15...0,45	0,03...0,135
2,0	0,20...0,60	0,04...0,18

Наибольшее распространение в автоматизированных системах контроля, в том числе в контрольно-сортировочных автоматах получили два типа преобразователей: индуктивные, позволяющие формировать аналоговый выходной измерительный сигнал и фотоэлектрические с дискретным выходным сигналом. Фотоэлектрические преобразователи обеспечивают сортировку деталей на большое число размерных групп, высокую точность измерения, однако имеют значительные габаритные размеры (100x156x260 мм). Индуктивные измерительные преобразователи имеют малые габаритные размеры (диаметр посадочной поверхности 8...28 мм), что позволяет создавать компактные измерительные станции.

В Таблице 2 приведены метрологические характеристики индуктивных измерительных преобразователей, а в Таблице 3 фотоэлектрических сортировочных преобразователей [6,8,10,11].

Анализ данных Таблицы 2 показывает, что наименьшая погрешность измерения индуктивного преобразователя составляет $\Delta_{un} = \pm 0,04$ мкм при диапазоне показаний $\pm 0,2$ мм (мод. М-021), в среднем величина погрешности индуктивных преобразователей цифровых и аналоговых приборов лежит в пределах $\Delta_{un} = 0,10...1,0$ мкм.

Наименьшая погрешность сортировочного фотоэлектрического преобразователя составляет $\Delta_{un} = \pm 0,12$ мкм (мод. 0,5ПФС), в среднем величина погрешности фотоэлектрических преобразователей лежит в пределах $\Delta_{un} = 0,12...1,2$ мкм (Таблица 3).

Сравнительный анализ расчетных (Таблица 1) и табличных значений погрешности преобразователей (Таблицы 2,3) показывает, что единичные модели преобразователей удовлетворяют требуемой точности измерения: индуктивный мод. М-021, $\Delta_{un} = \pm 0,04$ мкм; с некоторым допущением

преобразователи мод. М-022, мод. 223, мод. 227 с погрешностью $\Delta_{ин} = \pm 0,05$ мкм для диапазонов сортировки $I_c = 0,5 \dots 2,0$ мкм; фотоэлектрический мод. 0,5ПФС для диапазонов сортировки $I_c = 1,5 \dots 2,0$ мкм.

Таблица 2 – Метрологические характеристики индуктивных преобразователей

Параметры	Цифровые приборы							Аналоговые приборы				
	М-021	М-022	М-023	М-024	75501 (75502)		БВ-76503	БВ-6067	мод.221	мод.222	мод.223	мод.234
Рабочий ход, мм	0,5	3,0	11	6,0	2,0		4,0	2,0	1,5	0,5	2,0	6,0
Диапазон показаний, мм	±0,2	±0,2	±1,0	±0,5	±0,02		±0,01; ±0,02	-0,02...+0,06	±0,3	6; 12; 30	6; 12; 30; 60; 120	30; 60; 300
			±2,5	±1,25	±0,2		±0,06;					
		±0,1	±5,0	±2,5	±1,0		±1,0	св. 0,06	±0,5			
Дискретность, мкм	0,01	0,1	0,1	0,1	Кл 0	Кл 1	Кл2	0,01				
					0,01	0,1	1,0	0,1				
								1,0				
Погрешность, мкм	±0,04	±0,05	±5,0	±1,0	±0,12	±0,18	±0,24	±0,09; ±0,18	±0,18	0,1; 0,2; 0,5; 1,0	0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 2,0	0,5; 1,0; 5,0
			±7,0	±2,0	±1,2	±1,8	±2,4	±0,6; ±0,9; ±1,8	±1,8			
			±1,5	±10,0	±3,5	±4,0	±5,0	±8,0	±5,0			
Чувствительность не менее мВ/мкм										25	0,2	0,05
Посадочный размер, мм	Ø8	Ø8	Ø8	Ø8	Ø8			Ø16	Ø8	Ø28	Ø8	Ø28
Измерительное усилие, Н								1,0	1,0±0,2	0,5±0,05	0,25±0,05	1,2±0,4
Смещение настройки на 65000 срабатываний							0,15		0,5			
							0,2					
							2,0					

Таблица 3 – Метрологические характеристики фотоэлектрических сортировочных преобразователей

Параметры	Модель							
	ДФМ				ПФС			
Интервал сортировки и цена деления шкалы, мкм	0,5	1,0	2,0	5,0	0,5	1,0	2,0	5,0
Число групп сортировки	20; 30; 40; 50				10; 20; 30; 40; 50			
Погрешность измерений: ±мкм ±деления шкалы					0,12	0,25	0,5	1,2
	0,25							
Смещение настройки за 25000 измерений: ±мкм ±деления шкалы					0,25	0,5	1,0	2,5
	0,5							
Измерительное усилие, сН	200				200			
Колебание измерительного усилия, сН	30	30	60	120	30	30	60	120
Присоединительный размер, мм	20				28			

В Таблице 4 показаны значения номинальных контролируемых размеров деталей, интервалов сортировки I_c , разноразмерности P и производительности Q отечественных автоматов контроля и сортировки тел качения подшипников [7], анализ которых позволяет оценить соответствие интервала сортировки I_c , погрешности сортировки $\Delta_{сорт}$ КСА и допускаемой погрешности измерения первичного преобразователя $[\Delta_{ин}]_{сорт}$.

Таблица 4 – Характеристики КСА для контроля тел качения подшипников

Модель КСА	Диаметр, мм	Интервал сортировки I_c , мкм	Разноразмерность P , мкм	Производительность Q , шт/час
402	1...2	0,4; 0,8	0,5; 1,0	7000
403	3...8	0,4	0,5	18000
408	8...13 13...18	0,6; 1,2	0,8; 1,5	7200
413	1...3	0,15	0,25	7000
415	3...8	0,15	0,25	7000
418	18...23	0,6	0,8	3600
37AK	1,6...3	0,5; 1,0	2,0; 3,0	10000
35AK	5...16	0,5; 1,0	0,5; 1,0	2500
44AK1	5...10	0,5	0,5	5000
44AK2	10...18	1,0; 2,0	1,0	2000

На Рис.4 показан график зависимости $P = f(I_c)$, построенный по данным Таблицы 4.

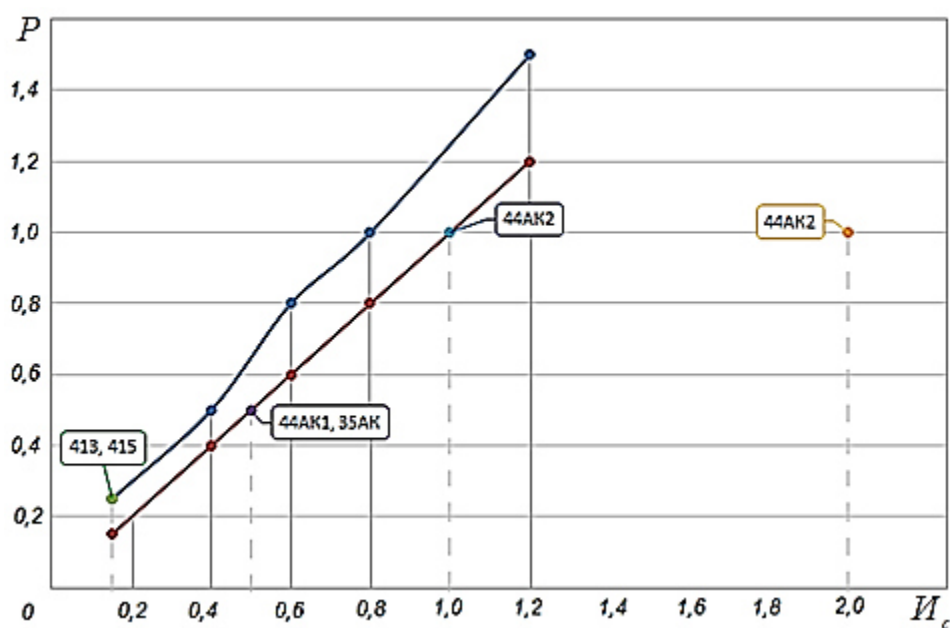


Рис.4 – График зависимости $P = f(I_c)$

Из Таблицы 4 и графика (Рис.4) следует, что только для интервалов сортировки $I_c = 0,5; 1,0$ и $2,0$ мкм удовлетворяется условие $P \leq I_c$. Для интервала сортировки $I_c = 0,15$ мкм разноразмерность P превышает величину интервала сортировки на 66%, для интервалов $I_c = 0,4; 0,8; 1,2$ мкм – на 25%.

Заключение.

1. Приведена методика расчета допускаемой погрешности измерения при сортировке $[\Delta_{изм}]_{сорт}$ и требуемой точности преобразователя Δ_{un} исходя из величины интервала сортировки I_c : $\Delta_{un} \leq (0,02...0,15)I_c$.

2. Рассчитаны значения погрешности сортировки $\Delta_{\Sigma сорт} = 0,01...0,6$ мкм и преобразователя $[\Delta_{un}]_{расч} = 0,002...0,18$ мкм для интервалов сортировки $I_c = 0,1...2,0$ мкм.

3. Проведенный сравнительный анализ расчетных значений допускаемой погрешности измерительных преобразователей показывает, что единичные модели индуктивных и фотоэлектрических преобразователей удовлетворяют требуемой точности измерения: индуктивный мод. М-021, $\Delta_{un} = \pm 0,04$ мкм; с некоторой натяжкой преобразователи мод. М-022, мод. 223, мод. 227 с погрешностью $\Delta_{un} = \pm 0,05$ мкм для диапазонов сортировки $I_c = 0,5...2,0$ мкм; фотоэлектрический мод. 0,5ПФС для диапазонов сортировки $I_c = 1,5...2,0$ мкм, а в интервалах $I_c = 0,1...0,4$ мкм преобразователи требуемой точности отсутствуют.

4. Приведенные характеристики различных моделей контрольно-сортировочных автоматов (Таблица 4) тел качения подшипников для диаметров от 1 до 23 мм, интервалов сортировки $I_c = 0,15...2,0$ мкм и производительности $Q = 3000...18000$ шт/час показывают, что используемые в схемах КСА измерительные преобразователи и режимы измерения обеспечивают разноразмерность деталей в группах сортировки превышающих величину интервала сортировки $P = I_c$. Только три модели 35АК, 44АК1, 44АК2 удовлетворяют условию разноразмерности для интервалов сортировки $I_c = 0,5; 1,0; 2,0$ мкм. В остальных рассмотренных КСА разноразмерность P превышает I_c на 25...66%: при $I_c = 0,15$ мкм разноразмерность $P = 0,25$ мкм, при $I_c = 0,4$ мкм – $P = 0,5$ мкм; при $I_c = 0,6$ мкм – $P = 0,8$ мкм; при $I_c = 0,8$ мкм – $P = 1,0$ мкм.

5. Резервы точности измерительных приборов, нашедших наиболее широкое распространение в технике, практически исчерпаны. Поэтому возможны два пути развития: либо заменить их на более дорогие, основанные, например, на новых принципах, либо использовать для

выбранного критерия более эффективные методики применения. Первый путь не всегда оправдан экономически. Если учесть огромное количество существующих образцов измерительной техники, созданных к настоящему времени, то можно отметить, что повышенную актуальность приобретает второй путь, связанный с разработкой прогрессивных процессов измерений, одним из которых является процесс, основанный на использовании многократных измерений [13] с обоснованием их количества.

6. Многократные измерения могут использоваться с целью уменьшения случайных составляющих погрешностей измерения в устройствах, применяемых для размерной сортировки деталей при селективной сборке изделий [14...18].

Библиографический список.

1. Шалыгин М.Г. Автоматизация измерений, контроля и испытаний: Учебное пособие / М.Г. Шалыгин, Я.А. Вавилин. – СПб.: Издательство «Лань», 2022. – 172 с.: ил.
2. Белкин И.М. Средства линейно-угловых измерений: [Справочник] / И.М. Белкин – М.: Машиностроение, 1987. – 536 с.
3. Бирюков Г.С. Измерение геометрических величин и их метрологическое обеспечение: [учеб. пособ. для студ. сред. спец. учеб. зав.] / Г.С. Бирюков, А.Л. Серко. – М.: Изд – во стандартов, 1987. – 384с.
4. Волосов С.С. Приборы автоматического контроля в машиностроении / С.С. Волосов, Е.И. Педь. – М.: Изд-во стандартов, 1975. – 336 с.
5. Гейлер З.Ш. Самонастраивающиеся системы активного контроля размеров / З.Ш. Гейлер – М.: Машиностроение, 1972. – 176 с.
6. Гольштейн А.Е. Физические основы измерительных преобразователей: учебн. пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 253 с.
7. Городецкий Ю.Г. Приборы и автоматы для контроля подшипников: [Справочник] / Ю.Г. Городецкий, Б. И. Мухин, Э.П. Савенок и др. – М.: Машиностроение, 1973. – 256 с.
8. Легаев В.П. Приборы автоматического контроля и управления в машиностроении: учеб. пособие / В.П. Легаев; Владим. гос. ун-т. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2009. – 123 с. ISBN 978-5-89368-980-8.
9. Сорочкин Б.М. Средства для линейных измерений / Б.М. Сорочкин, Ю.З. Тененбаум, А.П. Курочкин. – Л.: Машиностроение, 1978. – 264 с.
10. Раннев Г.Г. Физические основы получения информации: Учебник / Г.Г. Раннев, В.А. Сурогица, А.П. Тарасенко – М.: КУРС, НИЦ ИНФРА-М, 2016. – 296 с.: 60х90 1/16. – (Бакалавриат) (Переплёт 7БЦ) ISBN 978-5-906818-39-3 - Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/544727>.
11. Шерстобитова А.С. Датчики физических величин: учебное пособие / А.С. Шерстобитова. – Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2017. – 27 с.

12. Этингоф М.И. Автоматический размерный контроль на металлорежущих станках: [текст] / М.И. Этингоф – М.: АПР, 2016. – 336 с.
13. Копп В.Я. Энтропийный подход к анализу метрологических характеристик измерительных приборов в машино- приборостроении / В.Я. Копп, А.И. Балакин, А.А. Скидан [и др.]. – Севастополь: Крымский Издательский Дом, 2020. – 340 с.
14. Филипович О.В. Модификация метода анализа влияния погрешностей измерения на показатели селективной сборки двух элементов путем применения многократных измерений / О.В. Филипович, Н.А. Балакина, А.И. Балакин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2024. – № 2(364). – С. 192-198. – DOI 10.33979/2073-7408-2024-364-2-192-198. – EDN RCEBAD.
15. Филипович О.В. Влияние погрешностей измерения на показатели однопараметрической многовариантной селективной сборки двух элементов / О.В. Филипович // Современные технологии сборки: Материалы VIII Международного научно-технического семинара, Москва, 19-20 октября 2023 года. – Москва: Московский Политех, 2023. – С. 149-154. – EDN VTMTS.
16. Филипович О.В. Определение количества комплектов при селективной сборке двух элементов с учетом влияния погрешности измерения / О.В. Филипович, Г.В. Невар, Н.А. Волошина [и др.] // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2023. – № 3. – С. 105-109. – DOI 10.36652/0202-3350-2023-24-3-105-109. – EDN JMKQCS.
17. Филипович О.В. Модель процесса одновариантной однопараметрической селективной сборки двух элементов с учетом погрешностей измерения при их сортировке / О.В. Филипович // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. – 2023. – № 3(23). – С. 93-101. – EDN TLIXMR.
18. Filipovich O. Method for taking into account measurement errors when sorting elements into selective groups / O. Filipovich, G. Nevar, N. Balakina [et al.] //International Russian Automation Conference (RusAutoCon 2023): Advances in Automation V, 2024. – PP. 174-182. – DOI: 10.1007/978-3-031-51127-1_17.

¹Балакина Наталья Анатольевна, старший преподаватель, ANBalakina@mail.sevsu.ru, Россия, Севастополь, ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

Balakina Natalia Anatolievna, Senior Lecturer, ANBalakina@mail.sevsu.ru, Russia, Sevastopol, Sevastopol State University

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ИЗМЕРЕНИЯ В МАШИНО-ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Научный журнал
Выпуск №3(31) 2025 г.

16+

Рубрики в соответствии с номенклатурой научных специальностей:

- 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ
- 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды
- 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

Адрес редакции:

299053, г. Севастополь, ул. Университетская, д. 33.

Телефон редакции: 8(8692)435002

<https://www.sevsu.ru/nauka/nt-potencial/pechat-izdaniya-vedushim/avtomatizatsiya-i-izmereniya-v-mashino-priborostroenii>

e-mail: appr.sevgu@yandex.ru

Отпечатано в издательстве СевГУ,

адрес типографии ФГАОУ ВО СевГУ:

299015, г. Севастополь, ул. Курчатова 7.

Публикуемые материалы прошли обязательную процедуру рецензирования и экспертного отбора. Авторы опубликованных материалов несут полную ответственность за подбор и точность приведенных фактов, цитат, данных, имен собственных и прочих сведений.

Редакция не несет ответственности за нарушение авторами исключительных прав на результаты интеллектуальной деятельности третьих лиц. Мнение редакционной коллегии может не совпадать с позицией авторов статей. При перепечатке материалов ссылка на научный журнал «Автоматизация и измерения в машино- приборостроении» обязательна.

Учредитель и издатель

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» ул. Университетская, 33.
Севастополь, 299053.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

№ рег. СМИ: ПИ№ФС77-73958 от 12.окт. 2018 г.

Главный редактор: Филипович Олег Викторович

Подписано к печати 26.05.2025. Заказ 10/2025. Дата выхода в свет: 20 . 06 . 2025. Тираж: 50 экз.
Цена свободная. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Объем усл. печ. л. 13,95.

Севастополь, 2025